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

Kardos Réka Anna

# Levegő segédközeges porlasztó permetképének vizsgálata reaktív környezetben

Konzulens:

Dr. Józsa Viktor egyetemi docens

Budapest, 2022

# TARTALOMJEGYZÉK

Előszó	1
1. Célkitűzés	2
2. Bevezetés	3
2.1. A mérőrendszer bemutatása	5
2.2. Felhasznált eredmények	9
3. A permetkép értékelése	10
3.1. Irodalmi előzmények	12
3.2. Levegő segédközeges porlasztó permetképének értékelése	17
3.2.1. Validációs ráta	17
3.2.2. Tüzelőanyag cseppek mérete	18
3.2.3. Sebességmező	25
3.2.4. Cseppméret-sebesség korreláció	31
3.2.5. Vizuális értékelés	36
4. Cseppek aprózódása és összeolvadása	39
4.1. Cseppaprózódás	39
4.1.1. Nyíráson alapuló cseppaprózódás	39
4.1.2. Turbulens cseppaprózódás	40
4.1.3. Cseppaprózódás a vizsgált permetben	41
4.2. Cseppek összeolvadása	42
5. A permet párolgásának modellezése	43
5.1. Szakirodalmi áttekintés a párolgás modellezésének témakörében	43
5.2. Helyettesítő keverékek	45
5.3. Az alkalmazott modell	46
5.3.1. Egykomponensű modell áttekintő ismertetése	46
5.3.2. Többkomponensű modell áttekintő ismertetése	46
5.4. Párolgás a vizsgált permetben	47
6. Összefoglalás	49
7. Irodalomjegyzék	52

## ELŐSZÓ

Dolgozatom célja, hogy felderítsem egy porlasztóberendezés permetképében kialakuló trendeket, tendenciákat, azonosítsam a benne lezajló folyamatokat, tehát valamiféle rendet teremtsek az összetettsége miatt kaotikusnak tűnő csepphalmaz viselkedésében. Ez minél jobban sikerül, annál közelebb juthatunk a valóság leírásához, tervezhetővé és számíthatóvá válnak olyan folyamatok, amelyek a gyakorlat szempontjából kritikusak lehetnek. Ez vezérelt arra, hogy részletesen elmerüljek egy permet mechanizmusaiban, az alapoktól felépítve a vizsgálatot, remélve, hogy minél tovább jutok.

\* \* \*

Köszönetnyilvánítás

A dolgozat elkészüléséért köszönettel tartozom konzulensemnek, Dr. Józsa Viktornak, aki mindvégig lelkiismeretesen segített, Milan Malý-nak akinek szaktudása és eszközei nélkül nem mehetett volna végbe a Fázis Doppler Anemométeres mérés, Csemány Dávidnak és Rácz Erikának, akik a témában szerzett korábbi tapasztalataikkal és eredményeikkel jelentősen hozzájárultak a dolgozat létrejöttéhez, és nem utolsó sorban a családomnak és a páromnak, Ákosnak a támogatásért.

A mérés a Brnoi Műszaki Egyetemmel együttműködésben történt a BME Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék Jendrassik György Hőtechnikai laboratóriumában. A kutatás a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-22-2-III-BME-79 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

Budapest, 2022.11.07.

Kardos Réka Anna

## 1. CÉLKITŰZÉS

A folyadéktüzeléssel működő berendezések alapvető működésére, károsanyag kibocsátására a porlasztás folyamata kritikusan hat. Az egyik legegyszerűbb kialakítású, gyakran alkalmazott típus az egyszerű sugaras levegő-segédközeges porlasztó, ennek ellenére a szakirodalomban kevés adat áll rendelkezésre róla. Ez megnehezíti a porlasztással járó, sokszor meglehetősen összetett mechanizmusok modellezését, a berendezés tervezését, üzemeltetését. Ez különösen igaz, ha reaktív rendszerről van szó – bár az energetika területén ez sokszor előfordul – vagy ha hagyományos helyett biotüzelőanyagot használnak. Célom a dolgozattal, hogy a mérési eredmények általános feldolgozása segítségével a folyadéktüzelés modellezéséhez támpontokat, illetve validációhoz strukturált adatbázist biztosítsak az adott mérési összeállítás mérési eredményeinek értékelésén túl.

#### 2. BEVEZETÉS

A folyadékok porlasztása során zajló mechanizmusok teljes megismerése fontos szerepet játszik az energetikában. Az egyre szigorodó környezetvédelmi eljárások megkövetelik a kibocsátott szennyezőanyagok csökkentését. Ehhez szükséges, hogy a tüzelőanyag már homogén, előkevert tüzelőanyaggőz-levegő formában érje el a lángfrontot. Így elkerülhetők a lokális hőmérsékletingadozások és a tüzelőanyagban szegény és dús részek váltakozása, melyek kedveznének a CO és NO<sub>x</sub> keletkezésnek. A nitrogén-oxidok keletkezése a légfeleslegtényező függvényében 1-nél enyhén nagyobb érték esetén éri el a maximumot, tehát kis kibocsátást vagy nagyon kis, vagy nagy légfeleslegekkel érhetünk el. Az utóbbi, azaz tüzelőanyagban szegény keverékek alkalmazása gyakoribb, melyeknél az elsődleges NO<sub>x</sub> keletkezési mechanizmus a termikus, azaz a magas hőmérsékletű égés során keletkező atomos oxigén a levegő nitrogénjével reakcióba lép, aminek NO keletkezés a végeredménye. Ez a levegő oxigénjével reagálva, jellemzően a hőerőgépek kipufogócsonkja után NO2-vé alakul. (Utóbbi az égés során is keletkezik, de csupán 5% körüli mértékben.) Magas nyomáson, amivel gázturbinákban találkozunk, az N2O keletkezése dominál, melyeket együttesen szokás NOx-nek nevezni. A termikus NOx keletkezése exponenciálisan nő a hőmérséklettel, ezért fontos, hogy homogén hőmérsékletmezőt alakítsunk ki. Ha a tüzelőanyag porlasztása során kialakuló cseppek mérete olyan nagy, hogy azok nem tudnak teljesen elpárologni az égőtér előtt, akkor az lokális hőmérsékletcsúcsokat fog létrehozni a tüzelés során, amelyek a berendezés élettartamát is negatívan befolyásolják. A nem megfelelő porlasztási majd párolgási folyamat működési instabilitásokhoz is vezethet, melyek könnyen meghibásodást okozhatnak [1]. Tehát a károsanyag-kibocsátást és a működést a teljes áramlástani folyamat, azaz a csepp- és a gázdinamika, a keveredés és a porlasztás, illetve a cseppek párolgásának és a gőz elégésének folyamata együttesen határozzák meg.

A Fázis Doppler Anemométer (PDA) használata széleskörűen elterjedt az áramlástannal öszszefüggésben lévő területeken, így a permetképződési, porlasztási és a párolgási folyamatok vizsgálatánál is [2,3]. Segítségével szimultán meghatározható a cseppméret- és a sebességeloszlás az adott, parányi mérőtérfogatban, több helyen mérve pedig a permet globális jellemzőiről tudhatunk meg többet. A permet fejlődésének értékelésében remek lehetőséget nyújt a PDA segítségével történő mérés, hiszen egyben szolgáltat a kiinduláshoz és a validációhoz szükséges adatokat azzal, hogy a kifúvástól számítva több távolságban is mérünk. Így már a kezdeti eloszlások is értékelhetővé válnak a tüzelési beállítások függvényében, ezzel támogatva a lejátszódó jelenségek minél részletesebb megértését. A munkámban alkalmazott PDA a permet számos jellemzőjéről nyújt információt, többek között cseppméretről, cseppeloszlásról, axiális sebességekről, illetve mindezek axiális és radiális eloszlásairól. A mérési technikáról és az adatok feldolgozásáról [4] nyújt további információt.

Habár számos tanulmány született már hagyományos szénhidrogén alapú folyékony tüzelőanyagok porlasztásáról, a világ tendenciái a megújuló alapú biotüzelőanyagok felé sodorják a napjainkban zajló kutatásokat. Sokszor emlegetett téma a fosszilis energiaforrások felhasználásának csökkentése, sokan ezzel együtt a jelenleg használt fosszilis folyékony tüzelőanyagok teljes kiveszését prognosztizálják az energiaiparból. A mostani helyzetben ez még távoli célnak tűnik, azonban bizonyos technológiák számára nincs más megoldás, mint ezek használata. Emellett vonzóbbá válhat az alkalmazásuk biotüzelőanyagok hozzákeverésével, melyet már jogi szabályozások is ösztönöznek. Mindez alátámasztható többek között az IEA (International Energy Agency) 2050-re készített STEPS (Stated Policies Scenario) alapú elemzéseivel [5], az Európai Bioüzemanyagok Technológiai Platformjának létrejöttével és a már bevezetőben is említett ReFuelEU javaslattal [6], mely növelni hivatott a fenntartható légijármű-üzemanyagok piaci részesedését az EU-ban. Emellett Magyarországon az olajkereskedőket is Uniós szabályozások kötik, hogy a terméküknek mekkora legyen a megújuló-részaránya, ezt dízelolaj esetén repce-metilészterrel (RME) teljesítik. A biotüzelőanyagok előállítása ugyanakkor kihívásokkal járhat, ugyanis az első generációs biotüzelőanyagok veszélyeztetik az élelmiszerellátás biztonságát [7], így olyan megoldásokat kell keresnünk, melyek diverz forrásból, speciális technológiát nem igénylő módon előállíthatók. Erre kiváló lehetőség a használt sütőolajból előállított biodízel felhasználása, melynek társadalmi háttere egyre inkább megerősödni látszik. A biotüzelőanyagok alkalmazásakor működési problémák léphetnek fel, például olyan nagynyomású technológiák esetén, mint a gázturbinák, belső égésű motorok, magasnyomású kazánok, ezért gyakran fosszilis tüzelőanyagokkal keverve használják. Ennek eredményeképpen a dolgozatomban a két fosszilis (kerozin, a kereskedelemben kapható dízelolaj (7% biodízel), és a tiszta biotüzelőanyag (30 V/V% használt sütőolaj (WCO) és 70 V/V% repceolaj észterezéséből készült) vizsgálata mellett egy keverék (50-50 V/V% biodízel és dízel) permetképét is értékelem.

A dolgozatomban először (2.1. fejezet), bemutatom a mérés menetét, a mérőrendszer elrendezését és tulajdonságait, majd olyan korábbi munkák eredményeit, amelyek ebben a dolgozatban is szerepet kapnak majd (2.2. fejezet). Ezt követi egy szakirodalmi áttekintés a levegő segédközeges porlasztók permetének elemzéséről, hogy a kapott eredményeket megfelelően lehessen minősíteni, összehasonlítani az eddigi kutatásokból nyert adatokkal (3.1. fejezet). A saját mérések átfogó kiértékelése alkotja a 3.2. fejezetet, majd a cseppaprózódásról, cseppek egyesüléséről (4. fejezet) és párolgásról (5. fejezet) is szó esik. Lezárásként összegzem a kapott eredményeket és levonom a végső következtetéseket.

#### 2.1. A mérőrendszer bemutatása

A dolgozat során kiértékelt mérések és számítások egy előkeveréses égőre vonatkoznak, tehát a keverékképzés a közegben még a lángfront előtt megtörténik. A vizsgált égőkialakítást az 1. ábra mutatja.



1. ábra. Az előkeveréses égő kialakítása [8].

A kialakítás gáz és folyékony tüzelőanyag alkalmazását külön-külön és együtt is lehetővé teszi. A dolgozatban kizárólag folyékony tüzelőanyagok vizsgálatára kerül sor, ezek a jobb oldali ábrán látható barna, centrális vezetéken áramlanak ki. Az ezt körülvevő gyűrűs keresztmetszeten porlasztólevegő áramlik ki, mely a porlasztócsúcson látható konfúzoron gyorsul fel. Az előmelegített égéslevegő a 45°-os axális perdítőelemeken keresztül halad, melyek a homogén keverékképzést segítik. Az alacsony nitrogén-oxid kibocsátást az eredményezi, hogy a hideg porlasztólevegő a porlasztáson kívül közel adiabatikusan tágulva körülveszi a tüzelőanyag áramot, így meggátolja a fokozott hőfelszabadulást a láng gyökerében, mely elsődleges oka az NO<sub>x</sub> keletkezésnek a szegény keverékű égők esetén. A mérések során a levegőelőmelegítés hőmérsékletét 250 °C-on tartottuk, míg a porlasztólevegő 0,3, 0,45, 0,6 és 0,75 bar túlnyomás értékeket vett fel. A füstgázban mért oxigénszintet végig 3%-on tartottuk, ez 1,167-es légfeleslegtényezőt jelent. A 2. ábra részletesen ábrázolja az alkalmazott mérőeszközöket és berendezéseket. A hőmérsékletméréshez termoelemeket (jellemzően 100 °C felett) és Pt100-as ellenálláshőmérőket használtunk. A zöld körrel jelölt részt emeli ki az 1. ábra. Részletesebb leírást a tüzelőberendezésről [8] nyújt.



2. ábra. A mérőberendezés vázlata.

Axiális távolság (mm)	Radiális mérési pontok száma (db)	Radiális osztás (mm)
15	15	1
25	21	1
35	17	1,5
45	21	1,5

1. táblázat. Mérési pontok pozíciója.

A lézeroptikai elven működő PDA berendezés sugárnyalábjai zöld színnel láthatók az ábrán. A lézersugarak által kialakított interferencia csíkrendszer lehetővé teszi a folyamatosan érkező gömbszimmetrikus folyadékcseppek méretének és sebességének mérését három fotodetektor segítségével, melyek a vízszintes síkban, 70°-kal elékelve voltak elhelyezve, ami a Brewster szög a bemutatott összeállításra, kiküszöbölve a tükröződést. Az alkalmazott zöld lézer hullámhossza 532 nm, teljesítménye 90 mW volt. A mérési pozíciók axiálisan és radiálisan is változtak, ezeket az 1. táblázat mutatja. A mérőberendezés korlátait (mérhető sebességeket, cseppalakokat) figyelembe véve csak a kifúvástól számítva minimum 15 mm-nél vagy annál távolabb lévő pontokat mértünk, a permet terjedésének megfelelően egyre szélesebb radiális tartományban. Adott pontban a mintavételek maximális száma 35.000 lehetett, azonban a permet szélén az alacsony cseppsűrűség miatt a másodlagosan állított 8 másodperces mintavételezési felsőkorlát gyakrabban érvényesült. Bár a mozgató állványzat a tér három irányában tudott volna mozogni, mi ebből csupán két irányt használtunk ki. A hengeres keverőcső miatt az axiális irány egyértelmű, a másik pedig egy átmérő volt, amin lépkedtünk a mérések során különböző axiális távolságokban. Mivel a geometria forgásszimmetrikus, ezért elvileg egy sugár mentén is elég lett volna a vizsgálatokat elvégezni, azonban a porlasztó apró méretei következtében kialakuló kisebb gyártási és összeállítási eltérések miatt a globális permetkép is némi torzultságot mutathat, amit mindenképp fel szerettünk volna deríteni. A harmadik koordináta az előzőleg említett átmérőre merőleges, második átmérő lett volna, azonban a kvarcüveg keverőcső fénytörése miatt korrigálni kellett volna a cseppről visszaverődő és szóródó fény útját, hogy az érzékeny optikai beállítás esetén a fotodetektor szisztematikus mérési hiba nélkül tudja gyűjteni a fényjelet.

A vizsgált tüzelőanyagok közül kettő fosszilis, egy tisztán biodízel és egy keverék. Előbbiek a D, mely a kereskedelemben kapható dízelolaj legfeljebb 7 V/V% biokomponenssel, a JP8 ("Jet-Propellant 8") kerozin, mely főként a katonai repülésben használatos. A B100 30 V/V% használt sütőolaj (WCO) és 70 V/V% repceolaj keverékének észterezésével nyert biodízel, míg a B50 a D és B100 50-50 V/V% arányú keveréke. A tüzelőanyagok sűrűségét, viszkozitását és felületi feszültségét különböző hőmérsékletekre Csemány [9] munkája alapján a 2. táblázat közli.

Hőmérséklet [°C]		30	40	55	70	85	95
	JP8	782,6	775,4	764,7	752,8	741,7	734,6
Sűrűség	D	814,0	807,0	796,3	785,7	775,8	769,0
$[kg/m^3]$	B50	842,3	835,3	824,6	813,3	803,6	796,9
	B100	871,2	864,0	853,8	843,5	832,6	826,2
	JP8	1,35	1,14	0,94	0,78	0,66	0,59
Kinematikai	D	2,60	2,10	1,60	1,27	1,02	0,89
viszkozitás [mm²/s]	B50	3,66	3,04	2,26	1,82	1,43	1,23
	B100	5,57	4,27	3,12	2,43	1,90	1,63
	JP8	24,56	23,78	22,61	21,49	20,37	-
Felületi	D	26,24	25,43	24,29	23,16	22,03	-
feszültség [mN/m]	B50	26,90	26,16	25,11	24,06	23,02	-
	B100	30,21	29,46	28,35	27,12	25,92	-

2. táblázat. Tüzelőanyagok anyagi jellemzői.

A tüzelőanyagáramok minden esetben úgy lettek beállítva, hogy a tüzelőberendezés hőteljesítménye 13,35 kW legyen. Mivel az alkalmazott négy tüzelőanyag fűtőértéke nem tér el egymástól jelentősen (37–43,3 MJ/kg), így a tüzelőanyagáramok is közel egyenlőek. Az egyes beállításoknál érvényes *ALR* értékeket (Air-to-Liquid Ratio: az alkalmazott porlasztólevegő tömegáramának és a tüzelőanyag tömegáramának hányadosa) a 3. táblázat közli.

Porlasztó- nyomás	B100	B50	D	JP8
0,3 bar	1,7	1,8	2,0	2,0
0,45 bar	2,3	2,5	2,7	2,7
0,6 bar	2,9	3,1	3,4	3,4
0,75 bar	3,6	3,9	4,2	4,2
	2 . / 1 1 / .	D /11/./ 1	ID / //1 ·	

3. táblázat. Beállítások ALR értékei.

A permet értékelése szempontjából fontos szerepet kapnak a dimenziótlan mennyiségek. A mérések során a permetben uralkodó Reynolds (Re), Weber (We) és Ohnesorge szám (Oh) tartományait a 4. táblázat tartalmazza. A és L indexek sorban a levegőt és a tüzelőanyagot jelölik, jelezve, hogy az adott mennyiség kiszámításában melyik anyag anyagi jellemzői lettek figyelembe véve, w [m/s] a cseppek relatív sebességét a gázhoz képest,  $d_0$  [m] pedig a tüzelőanyag sugár átmérője, ami ebben az esetben 1,2 mm.

		B100	B50	D	JP8
$\mathbf{P}_{0} = wd_{0}$	Min.	275	326	316	295
$\operatorname{Re}_{A} = \frac{1}{\nu_{A}}$	Max.	704	724	855	738
$\mathbf{P}_{0} = wd_{0}$	Min.	1867	3462	4687	8492
$\operatorname{Re}_L = \frac{\nu_L}{\nu_L}$	Max.	4776	7695	12680	21280
$w^2 d_0 \rho_A$	Min.	4,2	6,3	5,5	5,2
$we_A = \frac{\sigma_A}{\sigma_A}$	Max.	33,7	38,2	42,3	39,7
$w^2 d_0 \rho_L$	Min.	5532	7979	6797	6146
$we_{L} = \frac{\sigma_{L}}{\sigma_{L}}$	Max.	44492	48694	52212	47083
$Oh = \sqrt{We_L}/Re_L$	-	0,030	0,020	0,014	0,007

4. táblázat. A dimenziótlan mennyiségek tartományai.

#### 2.2. Felhasznált eredmények

A dolgozatban felhasznált gázsebességeket Rácz határozta meg egy újonnan kifejlesztett módszerrel, melyet [10] taglal. A párolgási folyamat modellezését Csemány már egyedi cseppekre többszörösen validált modelljével végzem [11,12], ezt az 5.3. fejezetben részletesebben ismertetem.

A párolgási modell használata igényli a tartózkodási időket, mint kilépési feltételt. A különböző beállítások melletti tartózkodási időket az 5. táblázat tartalmazza ms-ban, a korábbi munkám alapján [13]. Fontos kiemelni, hogy minden érték a permet tengelyére (r = 0) vonatkozik, az egyes oszlopok a Z15 mm és az oszlop tetején megnevezett axiális távolság közti út megtételéhez szükséges időt tartalmazzák. A táblázatban, és a dolgozat további részében az r-t követő számok a radiális távolságot, míg a Z-t követő számok az kifúvástól mért távolságot jelölik, mm-ben.

			D			B50			B100			JP8	
		Z25	Z35	Z45	Z25	Z35	Z45	Z25	Z35	Z45	Z25	Z35	Z45
	0,3 bar	0,121	0,267	0,449	0,120	0,255	0,411	0,125	0,264	0,437	0,115	0,256	0,439
°C	0,45 bar	0,094	0,208	0,355	0,096	0,211	0,357	0,096	0,209	0,351	0,091	0,202	0,344
250	0,6 bar	0,073	0,164	0,284	0,085	0,184	0,308	0,085	0,182	0,305	0,082	0,180	0,302
	0,75 bar	0,072	0,159	0,267	0,077	0,168	0,284	0,078	0,164	0,271	0,073	0,159	0,266
		5 tál	lánat T	aut á - ko a	láci i dő	[mall(O	-lon out	hat war		uint al ál	á <b></b>		

5. táblázat. Tartózkodási idő [ms] (Oszloponként nagyság szerint skálázva).

## 3. A PERMETKÉP ÉRTÉKELÉSE

Folyékony tüzelőanyagok esetén, ahol valójában a folyadék gőze ég, egy tüzelőberendezés sikeressége – hogy stabil égés valósuljon meg, a lehető legkisebb károsanyag kibocsátás mellett – erősen függ attól, hogyan, mennyi idő alatt tud a tüzelőanyag elpárologni. Az égő feladata ennek az időnek a lerövidítése. Ezt a porlasztók a folyadék fajlagos felületének megnövelésével, azaz a tüzelőanyag cseppekre bontásával érik el. Minél kisebbek a keletkező cseppek, annál rövidebb idő kell az elpárolgáshoz, illetve minél kisebb az anyag viszkozitása, annál finomabb permet jön létre. Ezen kívül a porlasztó felel a csepphalmaz levegővel való keveredéséért is, amely segít a megfelelő lángalakot és méretet kialakítani [14].

A gyakorlatban számos porlasztófajta létezik, amelyeket az energetikán kívüli területeken is gyakran alkalmaznak, pl. élelmiszer- vagy vegyiparban. Ezeket több módon is rendszerezhetjük, tüzeléstechnikában nyomás-, segédközeges- és mechanikus porlasztókat szokás megkülönböztetni [14]. Az egyik leggyakrabban használt megoldás a levegő segédközeges porlasztó, a dolgozatban értékelt permetkép is egy ilyen típusú porlasztótól származik. Segédközeges porlasztók esetében a tüzelőanyag tűztérbe jutását a tüzelőanyag nyomása biztosítja. A porlasztást okozhatja a segédközeg (jelen esetben levegő, de gőzt szintén szoktak segédközeg általi nyírása vagy a kettő kombinációja [14]. Mindezen porlasztókban a cseppképződésnek három alapvető fajtáit tudjuk megkülönböztetni [14]:

#### A fúvókából cseppekre széteső folyadéksugár lép ki:

Megfigyelések azt mutatják, hogy a sugár instabil, ha a hossza nagyobb a kerületénél. A bomlás a levegő hatása és a folyadék Reynolds száma ( $\text{Re}_f = \rho_f w_f d_0 / \mu_f$ ) alapján négyféle módon következhet be:

•Kis Re<sub>f</sub> esetén: a felületi feszültség hatására a folyadéksugár felülete tengelyszimmetrikusan egyre inkább hullámozni kezd (tágul és összehúzódik), majd szétesik. A keletkezett cseppek átmérője közel azonos, nagyobb lehet a sugár átmérőjénél. A sugár szétesés előtti hosszúsága (*L*) arányos a kiáramlási sebességgel. A szétesés bekövetkeztének ideje nagyobb viszkozitással rendelkező anyagoknál a fúvókaátmérő ( $d_0$ ) 1,5 hatványával, nem viszkózus folyadékoknál magával a fúvókaátmérővel arányos. Ezt a folyamatot (melyre a levegőáramlásnak nincs hatása) *Rayleigh-féle aprózódás*nak nevezik. • Magasabb sebességeknél a felületi feszültség mellett jelentős a sugár és a levegőáram közötti sebességkülönbség is. A kettő együtt statikus nyomáseloszlást okoz a sugár mentén és segíti a porlasztótól távolodva egy növekvő táguló, összehúzódó hullámzás kialakulását. Emiatt a cseppaprózódás felélénkül. A cseppek most is a fúvókától több sugárátmérőnyi távolságban jönnek létre, méretük nagyságrendileg megegyezik a sugár átmérőjével. Ezt a fajta sugárbomlást *Első sebességkülönbség által gerjesztett aprózódásnak (First wind-induced breakup)* nevezik.

• Amennyiben az aerodinamikai hatások növekednek és a felületi feszültség hatása csökken, rövidebb hullámhosszal rendelkező, szinusz-jellegű felületi hullámok jönnek létre, melyek (sebességkülönbség okozta) növekedése vezet a cseppek kialakulásához, melyek ez esetben is a kifúvástól távol (több sugárátmérőnyi távolságra) jelennek meg. A cseppméret sokkal kisebb a folyadéksugár méreténél. Ezt *Második sebességkülönbség által gerjesztett aprózódás*nak (*Second wind-induced breakup*) nevezik.

•Nagy Re<sub>f</sub> esetén: Már a fúvóka kilépésénél teljesen szétesik a folyadéksugár, a cseppek mérete sokkal kisebb, mint a sugáré. A folyamat magyarázatát a fúvókanyílásban létrejövő kavitáció adja. Ezt *porlasztás*nak nevezzük. Igyekszünk erre a folyamatra törekedni, mivel ez a leggyorsabb és ez idézi elő a legkisebb cseppeket valamennyi mechanizmus közül.



3. ábra. Cseppképződési mechanizmusok tartományai [14].

A négy folyamat között az átváltást egy  $\text{Re}_{f}$  és Ohnesorge szám diagramon szemléltethetjük (3. ábra). Az 4. táblázat alapján a vizsgált permet a (4) Porlasztás tartományba esik. Fontos megjegyezni, hogy a 3. ábra vízszintes tengelyén a Reynolds szám számítása nem a relatív, hanem az abszolút folyadéksebességgel történik.

#### A fúvókából cseppekre széteső kúpos (hiperboloid) alakú filmfolyadék lép ki:

Az idealizált modell a következőképpen néz ki. A folyadékfilm felülete a kifúvástól távolodva növekszik, így az elvékonyodik. Mikor a film instabillá válik, akkor cseppekre bomlik el. Ennek a folyamatnak a kezdete az, hogy a film az instabilitás miatt felhullámosodik, majd elszakad és szalagok (közel hengeres keresztmetszetű gyűrűk) válnak le róla. Ezek a Rayleighféle mechanizmust követve aprózódnak tovább, és a gyűrű átmérőjénél nagyobb átmérőjű cseppek jönnek létre. Ehhez képest a valóságban síkfilmeknél háromfajta bomlást: gyűrűs, hullámos és perforált bomlást mutattak a kísérletek. A gyűrűs alak a nagy viszkozitással és felületi feszültséggel bíró anyagokra jellemző, nagyméretű cseppek keletkezése mellett. A hullámos bomlás áll legközelebb az elméleti megfontolásokhoz: az elvékonyodó hullámokról leváló részek a felületi feszültség miatt igyekeznek egyben maradni, összekapcsolódni, azonban a levegőáram és a turbulencia miatt nem tud hálós szerkezet kialakulni, hanem cseppekre bomlik fel a folyadékcsomag. A harmadik folyamat a perforáció, amely a bordák irányában indul. A lyukak eleinte rohamosan növekednek, majd szabálytalan alakú szalagokat hoznak létre. Ezek aprózódnak tovább különböző méretű cseppekre.

#### A fúvókából egyedi folyadékcseppek lépnek ki:

Ez olyan porlasztókialakításoknál fordul elő, ahol a porlasztó közeg cseppeket ragad magával a folyadékból. A leszakított cseppek mérete függ a közeg torlódásának mértékétől és a folyadékjellemzőktől. A cseppképződési gyakoriság a folyadék (ki)áramlási sebességétől függ. Idealizált esetben a leszakadás pillanatában a cseppre ható erő és a csepp nyíróellenállása tart egyensúly egymással. A valóságban ehhez képest többtengelyű feszültségi állapot ébred, illetve a cseppek alakja is torzul, következésképpen a méretük sem lesz teljesen egységes.

#### 3.1. Irodalmi előzmények

Célom ebben az alfejezetben, hogy áttekintsem azokat az irodalmi előzményeket, melyekre a 3.2. alfejezetben hivatkozni fogok. Urbán és tsi. [15,16] levegő segédközeges porlasztó által létrehozott permet cseppméret eloszlását vizsgálták 2D PDA segítségével, nem-reaktív, atmoszférikus környezetben. A vizsgált anyagok víz, nyers repceolaj, könnyű fűtőolaj és Diesel olaj voltak, az alkalmazott porlasztónyomások (0,3, 0,6, 0.9, 1.2, 1.8, és 2.4 bar) valamivel szélesebb tartományban változtak, ami lefedi a jelen mérés során alkalmazott beállításokat is. A különböző folyadékok széles viszkozitási tartományt képviselnek, ami megkönnyítette a különböző cseppmérettartományok vizsgálatát. Méréseiket 25, 40, 55, 70, és 100 °C-ra előmelegített tüzelőanyagokkal végezték, ebből a saját eredményeimmel csak a környezeti hőmérsékletet megközelítő 25 °C összehasonlítható. Az *ALR* értéke 0.78-2.07 között alakult, ami valamivel kisebb, mint ebben a dolgozatban. Szintén Urbán és tsi. egy másik munkájukban [17] 2D Fázis Doppler Anemométer segítségével vizsgálták levegő segédközeges porlasztó dízelolaj permetét atmoszférikus, nem-reaktív környezetben, elemezték a permet fejlődését, valamint a gáz és a folyadék turbulens tulajdonságait. Az alkalmazott porlasztónyomások 0,3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.6, 2.1, 2.6 és 3.1 bar voltak.

Wu és tsi. [18] PDPA-val (Phase Doppler Particle Analyzer) és képalkotó technikával vizsgálták egy kisnyomású, belső keverésű, szakaszos gáz-folyadék porlasztás cseppdinamikáját, különös tekintettel a tömegáram-arányok (a folyadék tömegáramának és a szállítóközeg tömegáramának aránya, ALR<sup>-1</sup>) hatására a folyamatban. A méréseiket atmoszférikus környezetben, noktán tüzelőanyagra végezték. A szerzők öt tartományt különítettek el cseppátmérő alapján, melyeknél a méret-sebesség korrelációt a Pearson-féle korrelációs együtthatóval jellemezték, mely egy esetben sem haladta meg a 0,3-at. Így a szerzők megállapították, hogy a kiválasztott működési feltételek mellett nincs észrevehető lineáris kapcsolat a porlasztott cseppátmérő és a sebesség között egy esetben, sőt globálisan sem. Wu és tsi. [19] ugyanilyen porlasztóval és mérési berendezéssel vizsgálták egy légiközlekedésben használatos kerozin permetét is, különböző befecskendezési paraméterek és környezeti feltételek mellett. Értékelték a befecskendezési idő, a környezeti nyomás és a porlasztónyomás permetképre gyakorolt hatását. A vizsgálat kiterjedt olyan kis környezeti nyomás értékekre is, amelyek a permetben forrást indítottak (flash-boiling). A szerzők megállapították, hogy a forrás elősegíti a cseppek térbeli terjedését a sebességük növelésével, illetve csökkenti a méretüket, tehát pozitív hatással van a kialakult permetre. A tüzelőanyag-befecskendezés időtartamának növelése növeli a folyékony tüzelőanyag-tartalmat a permetben, ezért az több kinetikus energiát használ fel a gyorsuláshoz. Ez a permet sebességének és behatolási távolságának csökkenését eredményezi, és enyhíti a cseppek aerodinamikai szétesését, így a cseppméret növekedését idézi elő.

Zaremba és tsi. [20] négy különböző, belső keverésű, azonos (alacsony nyomású) üzemi körülmények között működtetett ikeráramú porlasztó permetképzését vizsgálták és hasonlították össze könnyű fűtőolajra. A vizsgált kialakításokat a 4. ábra mutatja, melyből látható, hogy a c) típus áll legközelebb a jelen dolgozatban alkalmazott porlasztóhoz.



4. ábra. Zaremba [20] által vizsgált porlasztó kialakítások.

Az elsődleges porlasztási folyamat megfigyelésére nagysebességű kamerát alkalmaztak, a kifejlett permet cseppdinamikáját PDA segítségével értékelték. A PDA mérések 100 mm-re a porlasztófejtől zajlottak, teljesen kifejlett permetben. Az eredményeik azt mutatják, hogy a permetképződés folyamata alacsony *ALR* esetén elsősorban a porlasztó belső kialakításától függ. A gáz mennyisége befolyásolja a belső kétfázisú áramlás jellegét, a folyadék felbomlásának mechanizmusát, a cseppdinamikát és az ebből eredő cseppméret-eloszlást. A porlasztók közötti különbségek az *ALR* növekedésével csökkentek, mivel a belső áramlások gyűrűssé váltak.

Lowe és tsi. [21] turbulens aceton permeteket és lángokat vizsgáltak kísérleti úton, közepes cseppsűrűséggel jellemzett helyeken, mivel ezek magukba foglalják a másodlagos porlasztási folyamatokat, esetlegesen az elsődleges porlasztási folyamat végét. Erre a célra egy koaxiális gázárammal rendelkező levegő segédközeges égőt fejlesztettek ki, melynél a centrális tüzelő-anyagáram kilépésének helye változtatható a visszahúzható tüzelőanyagvezeték segítségével. A távolságot a tüzelőanyag és a koaxiális levegőáram kilépése között recessziós hossznak ( $L_r$ ) nevezzük. Minél kisebb az alkalmazott recessziós hossz, az annál sűrűbb permetmagot eredményez a fúvóka kilépésénél, hiszen annál kevesebb idő van a levegőárammal való keveredésre. A porlasztó kialakítását a 5. ábra szemlélteti, látható, hogy ha a recessziós hossz 0 mm, akkor az a jelen dolgozatban alkalmazott porlasztóhoz hasonló kialakítást jelent.

Sűrűbb permetek (kisebb  $L_r$ ) esetén az axiális átlagsebesség értéke a tengelyben alacsonyabbnak mutatkozott, mint hígabb permetek esetében. A sebességfluktuáció a kifúváshoz közel a sűrűbb permetekben volt jelentősebb, míg a kifúvástól távol ez felcserélődött. A reaktív és nemreaktív vizsgálatokban a kifúvásánál a permetek belső magja azonosnak adódott, azonban látszott, hogy a permetszéleken, reaktív esetben a láng felemészti a cseppeket. A szerzők nagysebességű árnyékképes mérést folytattak különböző tüzelőanyag-tömegáramok és recessziós távolságok mellett.



5. ábra. Lowe [21] által vizsgált égőkialakítás.
(1 - pilot áram, 2 – levegő áram, 3 – tüzelőanyag áram)

Kourmatzis és tsi. [22] ugyanezen porlasztó által létrehozott hideg biodízel és etanol permeteket vizsgáltak. Az értékelést PDA és nagysebességű képalkotás segítségével végezték. A szerzők Reynolds szám, tüzelőanyag-levegő tömegáramarány, radiális és axiális távolságok alapján hasonlították össze a négy tüzelőanyag impulzusvesztési és cseppméret karakterisztikáját. A három alkalmazott biodízel molekulái eltérő lánchosszúsággal rendelkeztek, így értékelhetővé vált a szerkezeti felépítés hatása is: A nagyobb szalagok megjelenésének valószínűsége a porlasztás során a hosszú molekulaláncú biodízelben sokkal nagyobb, míg az etanol és a rövid molekulaláncú biodízel nagyon hasonló eredményeket adott.

Chong és tsi. [23] a repce-metilészterek (RME) híg perdületes permetének égési jellemzőit hasonlították össze Jet-A1 tüzelőanyaggal egy gázturbinákban használatos égőberendezésben. Mindkét tüzelőanyag esetében 6 kW-os állandó teljesítményt állítottak be. A levegő-segédközeges porlasztóval létrehozott peremet körül – hasonlóan az ebben a dolgozatban vizsgált porlasztóhoz – örvénylő, forró légáramot vezettek be, melynek hőmérséklete 350 °C volt. A szerzők mérték a tüzelőanyag cseppméretét és sebességét, a gázfázis áramlásának jellemzőit és vizsgálták a láng reakciózónáit, mindezt PDA, és PIV (Particle Imaging Velocimetry) segítségével. A méréseket a kifúvástól 10, 15 és 20 mm-re végezték. A szerzők a Jet-A1 és az RME reaktív áramlási mezőit majdnem azonosak találták, annak ellenére, hogy a lángjaikban a reakciózónák jellemzői jelentősen eltértek, feltehetően az RME hosszabb párolgási idejének köszönhetően. A hasonlóság nem váratlan, mivel az áramlást elsősorban az porlasztó áramlási tulajdonságai határozzák meg. Chong és tsi. [24,25] ugyanezt a vizsgálatot elvégezték RME-dízel 50-50%-ú keverékére is, illetve az RME és a keverék eredményeit összevetették a tiszta dízelolaj esetével. Megállapították, hogy a permet belső magjában lévő alacsony cseppsűrűség, kisebb cseppméretek a forró gázok által okozott intenzív konvektív párolgásnak köszönhető,

amely gyorsan felemészti a cseppeket. Ehhez képest a láng határain kívül elhelyezkedő cseppek, ahol a hőmérséklet valamivel alacsonyabb, nagyobb mérettel rendelkeznek. A szerzők ezt egy korábbi, nemreaktív permetre nyert eredményekkel való összehasonlítással igazolták, ahol a cseppkoncentráció a központi régióban jelentős volt [26]. A cseppkoncentrációk az RME esetében voltak a legmagasabbak, míg a keveréknél a dízelhez hasonlóan alacsonyak. A keverékre kapott eredmény arra utal, hogy az RME hozzáadása a dízelolajhoz nem lineáris párolgási folyamatot eredményez, de mivel a vártnál gyorsabb a párolgás, ez a hatás pozitív. Az RME-láng magas cseppsűrűsége részben a dízelolajhoz képest 17%-kal nagyobb tüzelőanyag-tömegáramlásnak köszönhető az állandó tüzelési teljesítmény mellett, valamint a biodízel lassabb párolgási sebességének, amely a biodízel alacsonyabb illékonyságából, magasabb forráspontjából és nagyobb felületi feszültségéből adódik. Ehhez képest jelen dolgozat eredményei legfeljebb mérsékelt párolgásra utalnak.

Chong és tsi. [27] ugyanilyen módon készítettek egy reaktív és nemreaktív permeteket öszszehasonlító elemzést is, melyben tüzelőanyagoknak kerozint (JET-A1) és pálmaolaj alapú biodízelt (PME) választottak. Az *ALR* minden esetben 2 volt, ez közel esik a saját mérési beállításokhoz. A nemreaktív permeteket a kifúvástól 30, 50 és 80 mm-re, míg a reaktívakat 10, 15 és 20 mm-re mérték. A cseppsebesség és a cseppátmérő eloszlása jelentősen különbözött a két esetben – előbbinél a tengely mentén visszaesés, míg utóbbinál csúcsérték kialakulása volt jellemző a reaktív esetekre, a nemreaktívakkal összevetve. Ezt a szerzők megállapításai alapján a perdületes légáram és a láng permettel történő kölcsönhatása, egy centrális recirkulációs zóna létrejötte okozza. A PME és a JET-A1 közötti különbségek hideg permet esetén alig, míg reaktív esetben megmutatkoztak, mivel az anyagi jellemzők befolyásolták a párolgást.

Hadef és tsi.[28] szintén kerozin reaktív permetére végeztek vizsgálatokat levegő segédközeges porlasztón, PDA segítségével, amit perdületes, forró légáram (200 és 400 °C) vett körül, akárcsak a Chong [24–27] munkáiban alkalmazott berendezésben. Az eredmények is hasonlóak Chong megállapításaihoz: A permet belső magjában alacsony cseppsűrűség, kisebb cseppméret volt jellemző, míg a nagyobb cseppek a perdület hatására a permetszélre sodródtak (a kisebbek elpárologtak a reakciózónán való áthaladáskor). A belső recirkulációs zóna észrevehető volt a sebességképen, a 45°-os perdítőelemen átvezetett légáram hatására a sebesség radiális komponense megközelítette az axiálisat. A levegőelőmelegítési hőmérséklet növelése jelentősen csökkentette a cseppméretet.

#### 3.2. Levegő segédközeges porlasztó permetképének értékelése

A fejezet a mérési eredmények feldolgozását, kiértékelését és a szakirodalomban található eredményekkel történő összevetését tartalmazza.

#### 3.2.1. VALIDÁCIÓS RÁTA

A PDA mérések jellemző tulajdonsága, hogy csak apró, közel gömbszimmetrikus cseppeket tudunk mérni. Azonban a permetben nem csak ez a geometria van jelen, gyakran hosszúkás, szalagszerű folyadékrészek sodródnak az áramlásban, különösen a porlasztófúvókához közel. A validációs ráta megmutatja, hogy az adott pontban beérkező minta hányadát értelmezte a PDA gömbszimmetrikusnak, azaz az egész mintának darabszám szerint hányad részére érvényesek a kapott eredmények. Ezt szemlélteti a 6. ábra.





Megállapítható, hogy a validációs ráta egyre növekszik az kifúvástól távolodva, tehát a folyadékrészek a permetben egyre inkább gömbszerűek, azonban a tengelyben még a 45 mm-es távolságnál is jelentősen elmaradnak a 100%-tól. A 15 mm és 25 mm-es axiális távolságoknál az értéke alacsonynak mondható, azaz a későbbi értékelés során figyelembe kell venni a tényt, hogy az itt mért értékek nem jellemzik a permet egészét, hiszen a szabálytalan folyadéktömegekről, szalagokról nem adnak információt, annak ellenére, hogy azok jelentős mértékben jelen vannak. Ugyanakkor ez az alacsony érték csak a tengelyt érinti, a validációs ráta radiálisan erős növekedést mutat, sok helyen 90% felett eredménnyel. A tüzelőanyagokat összehasonlítva elmondható, hogy a validációs ráta sorban JP8-ra, D-re, B50-re majd B100-a egyre kisebbé válik, alacsonyabb porlasztónyomás esetén valamivel kedvezőbbek az értékek.

#### 3.2.2. TÜZELŐANYAG CSEPPEK MÉRETE

A Sauter középátmérő (Sauter Mean Diameter, a továbbiakban *SMD*) a cseppek átlagos méretéről ad számunkra információt. Ez egy olyan származtatott cseppátmérő, amely a teljes adatsor (ez jelen esetben egy egyedi porlasztási beállítás és egy egyedi mérési pontban a mintavételezett cseppek összessége) térfogat/felület arányával egyezik meg, ezt mutatja a permet egészére a 7. ábra.





Az *SMD* értéke JP8-ra, D-re, B50-re és B100-ra sorban növekszik, megfelelően a növekvő viszkozitás és felületi feszültség értékeknek (2. táblázat), akárcsak Chong [23] mérései során. Az érték jellemzően a tengelyben a legmagasabb, azonban a bal perifériát is nagy cseppméretek jellemzik, a permet ilyen szempontból olyan aszimmetriát mutat, ami a validációs ráta értékén nem mutatkozott meg. Urbán és tsi. [15] nemreaktív környezetben, hasonló porlasztóberendezésen végzett méréseik során megállapították, hogy a permet szélén magasabb az *SMD*, gyakoribbak a nagyobb cseppméretek. Chong [23,25] ugyanezt állapította meg reaktív permetekre, okát a nagyobb cseppek perdületes légárammal szembeni tehetetlenségének tulajdonította. Ez

összhangban van az SMD vizsgálatakor látottakkal (7. ábra). Annak oka, hogy csak a bal oldalon szignifikáns a jelenség, aminek az oka feltehetően a permet enyhe ferdesége. Szintén Urbán és tsi. egy másik munkájukban [17] a dízelolajra vizsgált permet SMD értékekeit ábrázolva magasabb porlasztónyomások (2.1, 3.1 bar) mellett, kis axiális távolságoknál (10, 15 mm) a középvonal mentén egyértelmű csúcsot azonosítottak, a másodlagos porlasztási folyamatot jelezve, miközben a permetszéli csepprégiók erős stabilitást mutattak. A turbulens és nyíró Weber szám számításokon alapuló stabilitáselemzés szintén azt mutatta, hogy a periférián áramló cseppek stabilak, míg az intenzív másodlagos porlasztás a permet középpontjára korlátozódik. Meghatározóbb mechanizmusnak a nyírásos aprózódás bizonyult. Ugyanakkor a szerzők megállapították, hogy a porlasztóközeg adiabatikusnak feltételezhető tágulása miatt a hőmérséklet jelentősen csökkenhet, ami növelheti a folyadékcseppek felületi feszültségét. Ez a folyamat segíthet a tengely közelében elhelyezkedő cseppek stabilizálásában. Alacsonyabb (0,3 és 0.9 bar) nyomásokon ez a folyamat csak kis mértékben, vagy nem is alakult ki, tehát az SMD értéke axiálisan távolodva közel állandó értéket vett fel. Centrális csúcs figyelhető meg jelen dolgozat eredményeinél is (biotüzelőanyagoknál erőteljesebben) azonban az nem csökken le ugrásszerűen, sőt egyes helyeken az SMD még növekszik is, ez különösen a B100 cseppek méreteinek Z15 és Z25 közti tengelymenti összevetésnél rajzolódik ki. Habár Urbán csak nagyobb porlasztónyomások mellett tapasztalt másodlagos porlasztást, az eltérő anyagjellemző értékek miatt (amit egyrészt a tüzelőanyag fajtája, másrészt az előmelegített levegőáram miatti magasabb hőmérséklet okoz) ebben a dolgozatban kisebb nyomások mellett is indokolt a vizsgálata, ezt a 4. fejezet taglalja. Érdekes megemlíteni, hogy Chong [27] nemreaktív permetre vonatkozó méréseiben (JET-A1 és PME esetére) nem tapasztalt csúcsot a középvonal mentén, csak a reaktív mérések során, ahol a tengely mentén egy recirkulációs áramlás eltérő sebességképet is okozott. Érdekes eredmény, hogy az SMD 45 mm-re a kifúvástól B100-ra és B50-re jelentősen lecsökkent, míg D-re és JP8-ra csak kismértékű változást látunk az axiális távolság növelésével.

Kourmatzis és tsi. [22] biodízelekre és etanolra nemreaktív körülmények között csak kismértékű másodlagos porlasztást észleltek, a kifúváshoz közel. Azonban a nagysebességű kamera felvételei alapján megállapították azt is, hogy a hosszabb molekulalánccal rendelkező biodízel esetében nagyobb felszakítatlan folyadékcsomagok maradtak, mint a rövidebb láncúak vagy az etanol esetében. Urbán [15] és Zaremba [20] az *SMD* csökkenését figyelte meg több tüzelőanyagra a nyomás növekedésével, csakúgy, mint azt a 7. ábra mutatta: minél nagyobb a porlasztónyomás, annál finomabb permet keletkezik, kisebb cseppméretekkel. Chong és tsi. [23] reaktív permetek esetén jelentős méretcsökkenést (és cseppszám csökkenést) állapítottak meg a párolgás miatt, ez saját eredményeimnél nem jelentkezett, köszönhetően egyrészt annak, hogy a saját mérési pontjaim jóval távolabb estek a lángtól, másrészt mivel Chong munkájában 100 °C-kal melegebb volt a perdületesen bevezetett égéslevegő hőmérséklete, mint a méréseim során.

A permet általános viselkedését jól meg lehet becsülni az átlagos cseppmérettel, mindazonáltal a méreteloszlás ismerete fontos a pontos modellezéshez. A megfelelő eloszlástípus kiválasztása kritikus, azonban számos lehetőség áll rendelkezésre, amelyeket az élet legkülönfélébb területein alkalmaznak sikeresen [15]: A GEV (Generalized Extreme Value) eloszlást gyakran használják biztosításoknál és pénzügyekben, hidrológiában a maximális napi csapadékmennyiség előrejelzésére, valamint a jövőbeni időjárás, a globális hőmérséklet-változás, légköri szenynyezés elemzésénél és prognosztizálásánál is alkalmazható. A Burr-eloszlás felhasználható az emberi élettartam-adatok elemzésére. A Nakagami eloszlást az 1960-as években kezdték alkalmazni nagyfrekvenciás rádióhullámok mérésekor, a közelmúltban a fading csatornák hatásának tanulmányozására is használták a vezeték nélküli kommunikáció területén. Ez az eloszlás egy másik, az ún. log-normális eloszláson alapul, melyet a szcientometriában és természeti jelenségek leírásánál alkalmaznak, például Lee és No [29] is használta cseppméret-előrejelzésre egy Venturi mosóban, Li és tsi. [30] egy csepp folyadékfilmbe való becsapódása során keletkező másodlagos cseppek jellemzésére, Lacour és tsi. [31] egy üreges permetkúp értékelésére, valamint Feng és tsi. [32] egy nagynyomású dízelolaj permet cseppméret-eloszlásának elemzésére. A Nakagami eloszlás ugyanakkor szintén rokonságban áll a Gamma eloszlással, amit ugyancsak használnak a vezeték nélküli kommunikáció, onkológia és idegtudományok, biztosítási eljárások stb. területén.

Urbán és tsi. munkájukban [15] úgy találták, hogy a 18 leggyakrabban illesztett valószínűségi sűrűségfüggvény közül általánosan a GEV és a Burr eloszlások adták a legjobb illesztést a háromparaméteres PDF-ek (Probability Density Function, azaz sűrűségfüggvény) közül, a kétparaméteresek közül pedig a Nakagami PDF magasan felülmúlta a többi modellt. Ugyanakkor a szerzők megjegyezték, hogy a permet globális modellezése egyetlen PDF segítségével nem lehetséges, mivel a különböző területek különböző aprózódási mechanizmusokkal rendelkeznek, illetve különböző előtörténetű cseppek kerülnek egy-egy régióba.



8. ábra. Legjobb illesztést adó PDF-ek.

Ha a permet külső régióit és 0,6 bar-nál kisebb porlasztónyomással végzett eseteket nem tekintették, a GEV PDF adta a legjobb illesztést a relatív log-likelihood érték tekintetében. A GEV PDF illesztési teljesítménye dízelre volt a legmagasabb, ezt követte a fűtőolaj és a víz, majd a repceolaj. Ez egybeesik a tüzelőanyagok viszkozitásának növekvő sorrendjével és jelen dolgozat eredményeivel, mint azt később taglalom. Urbán és tsi. a teljes permetet vizsgálva a Burr PDF-et találták legmegfelelőbbnek a modellezésére, mivel a peremterületeken is jól mű-ködött, illetve a középvonal környezetében is jó becslést adott, egyúttal ez a PDF rendelkezett a legmagasabb átlagos relatív log-likelihood-dal. Ez máshogy alakult a dolgozat eredményeiben: az adott beállítások mellett mért mintára a legjobb illesztést adó PDF-et a 8. ábra mutatja. A permetszéleken a GEV PDF bizonyult legtöbbször a legjobb illesztésnek, a Burr PDF pedig a tengely közelében. Azonban a kifúvástól távol, Z35 és Z45 esetén az a tartomány, ahol a GEV PDF értéke a legkedvezőbb kibővült, jelentősen lecsökkentve a Burr eloszlással jól lekövethető tartományt, így a legmagasabb átlagos log-likelihood-dal a GEV eloszlás rendelkezett.

A szakirodalomban a leginkább alkalmazott, kétparaméteres Rosin-Rammler (Weibull) eloszlást a Nakagami illesztésben felülmúlta mind a szerzők munkájában, mind a saját méréseim során, azonban, ha a permet uralkodó cseppméretének, például az *SMD*-jének számítása a cél, akkor a szerzők számításai alapján továbbra is ez adja a legjobb eredményt.

A szerzők megemlítették még a log-normális PDF-et, mivel jó illeszkedési minőséget biztosított az köztes permetezési tartományokban, illetve a 0,6 bar-nál kisebb porlasztónyomásoknál, ahol a többi PDF nem teljesített jól. Fontos megemlíteni, hogy jelen dolgozatban a kétparaméteres eloszlások között a Gamma valamivel felülmúlta a Nakagami eloszlást az átlagos loglikelihood értékben, ezért ennek a teljesítménytérképét ábrázolja a 9. ábra, harmadik helyen pedig a lognormális eloszlás jelent meg. Azonban megjegyzendő, hogy mindegyik eloszlás hasonló térképet produkált, csupán az értékek általánosan magasabbak (GEV) vagy alacsonyabbak (Nakagami, Lognormális) rajta.



9. ábra. Gamma PDF teljesítménytéképe.

Az illesztett PDF-ekre a Urbán és tsi. általánosan megfogalmazták, hogy az illesztési teljesítmény javul a porlasztónyomás növekedésével, ez a teljesítménytérképen (9. ábra) is megfigyelhető. A szerzők úgy találták, hogy a permet széle felé haladva az illesztési teljesítmény csökken, különösen nagyobb axiális távolságoknál. Ezt azzal indokolták, hogy ebben a régióban a cseppek meglehetősen vegyesek, jelen vannak az elsődleges porlasztásból létrejött nagyméretű cseppek és a továbbaprózódás során létrejött kisebb méretű cseppek is, ezek szabálytalan méreteloszlásokat hoznak létre. Saját méréseim során ezzel éles ellentétben a permetszélen mutatkoztak a legjobb illesztések, habár ott valóban megfigyelhető a romlás az axiális távolsággal. Wu és tsi. [19] munkájukban a cseppméret-eloszlásra a Lognormális eloszlást illesztették a legjobb eredménnyel, míg Chong és tsi.[23] reaktív permetre a Rosin-Rammler eloszlást.

Dolgozatomban két szempont, az egyszerűség és a releváns alkalmazási területek alapján a mért cseppméret-eloszlásokra a Gamma eloszlás illesztése mellett döntöttem.





Az 10. ábra B100 tüzelőanyagra ábrázolja a cseppméret-eloszlások változását mind radiálisan (a permet bal oldalára), mind axiálisan 0,6 bar porlasztónyomás mellett. Wu és tsi. [18] munkájukban n-oktán tüzelőanyagra megállapították, hogy a kis átmérőjű cseppek aránya fokozatosan nő, ahogy a mintavételi pozíció fokozatosan eltávolodik a sugár tengelyétől, viszont a cseppméret-eloszlás hasonló a különböző axiális távolságoknál. Ez a 10. ábra alapján csak részben igaz: látható, hogy minél távolabb vizsgáljuk a permetet a kifúvástól, annál kisebb az eltérés a periféria és a tengely között az eloszlások tekintetében. Míg Z15-nél majdnem a maximális radiális távolságnál mutatkozik a legkisebb cseppméret, addig Z25 és Z35 esetén inkább a tengely és a permetszál között félúton, ez összhangban van a 7. ábra megfigyeléseivel. Ugyanakkor a sűrűségfüggvény többletinformációt is hordoz: azokon a helyeken, ahol ezek a minimális cseppméretek jelentkeznek, sokkal kisebb a PDF-ek szórása, "élesebb" csúcsot tapasztalunk. Ez azt jelenti, hogy ezeken a helyeken monodiszperzebb a permet, mint másutt. Megemlítendő, hogy Wu és tsi. [19] eredményeik azt mutatták, hogy a kevésbé egyenletes méreteloszlás intenzívebb párolgást idéz elő a kisebb méretű cseppek magasabb számú jelentléte miatt.

A Gamma eloszlás két paraméterrel, k-val és  $\Theta$ -val jellemezhető, előbbi a PDF "csúcsosságáért" felelős alakparaméter, utóbbi pedig a skálaparaméter, amely megmutatja, mennyire széles tartományban terül el a PDF. A Gamma eloszlás sűrűségfüggvénye a következő [33]:

$$f(x) = \frac{1}{\Gamma(k)\theta^k} x^{k-1} e^{-\frac{x}{\theta}}.$$

Az eloszlás várható értéke kifejezhető, mint  $k\Theta$ , szórásnégyzete pedig mint  $k\Theta^2$ . A permet globális értékelése céljából az illesztett Gamma eloszlások várható értékét (ami magától értetődően jelentősen korrelál az *SMD* értékekről készült ábrával) és szórásnégyzetét 11. ábra és a 12. ábra mutatják. Az üres területek azokat a beállításokat jelzik, ahol a maximális 35.000 csepp 1%-ánál, azaz 350 cseppnél kevesebb mérési adat állt rendelkezésre, így nem illesztettem eloszlást, ami torzíthatta volna az eredményeket.



11. ábra. Gamma eloszlás várható értéke.



12. ábra. Gamma eloszlás szórásnégyzete.

Az eloszlás várható értéke és szórásnégyzete is egyértelműen B100 esetén a legmagasabb, ezt követi B50 majd a D és a JP8. Tehát a biodízel tartalmú tüzelőanyagokat szélesebb mérettartomány jellemzi, a PDF görbe laposabb jelleget mutat, mint az a dízelre vagy kerozinra jellemző. Urbán [15] ugyanerre a következtetésre jutott dízelolaj és repceolaj hideg permetének összevetése során. Nagyobb axiális távolságoknál egyértelműen látszik a permet aszimmetriája.

A tengelyben és a periférián jellemzően nagyobbak a cseppméretek és szélesebb tartományban változnak, mint közepes radiális távolságoknál, azonban minél nagyobb az axiális távolság, ez a különbség annál inkább elhalványodik, a paraméterek értéke radiálisan egyenletesebbé válik. Ezt a 10. ábra is jól mutatja. Azonban ez alól JP8 némiképp kivétel, hiszen a szórásnégyzete megnő az axiális távolsággal, tehát a kifúvástól távolodva egyre többféle cseppátmérőt tapasztalunk a permetében.

A porlasztónyomás növelésével a permet várható értéke és szórásnégyzete is csökken. Ez növeli a PDF maximumát, tehát egyre inkább monodiszperzzé válik a permet, amellett, hogy a jellemző mérete csökken, ezt Wu és tsi. [18] is megállapították n-oktánra végzett atmoszférikus porlasztási kísérleteik során.

#### 3.2.3. Sebességmező

A cseppméretek mellett a permetben kialakuló áramlási sebességek ismerete is fontos. Rácz [10] módszere alapján meghatározhatóak a lokális gázsebességek, ezt ábrázolja a 13. ábra. Az üres terek itt is a megfelelő mennyiségű adat rendelkezésre állásának hiányát jelzik. A módszert minőségileg igazolja, hogy a különböző tüzelőanyagoknak nincs jelentős hatása a gázáram sebességterére, habár a maximum érték néhány helyen eltér. Ez feltehetően a mérési paraméterek beállításának bizonytalanságából ered. A gázsebesség egyértelműen csökken a kifúvástól távolodva, csakúgy, mint a porlasztónyomás csökkenésével és a radiális távolsággal.

A gázsebesség fluktuációját a 14. ábra szemlélteti. Az ingadozás a porlasztótól távolodva csökken, csakúgy, mint radiálisan, és a porlasztónyomással együtt növekszik. Értéke eleinte (Z15, Z25) a tengely mellett maximális, magában a tengelyben alacsonyabb, de a két csúcs az axiális távolság növelésével (Z35, Z45) középen eggyé olvad össze.



14. ábra. Gázesebesség fluktuáció (rms) [m/s].

A cseppek PDA-val mért axiális sebességét ábrázolja a 15. ábra. Chong [23] megfigyelte RME és JET-A1 reaktív, illetve PME és JET-A1 hideg permeteire [27], hogy az axiális sebességértékek a kifúváshoz közel a tengely közelében tetőznek, majd a fúvókától távolodva lecsökkennek, ahogy a permet szétterjed és lendületet cserél a környező gázzal. Ez ebben az esetben is igaz. Megjegyzendő azonban, hogy Chong reaktív permetei a tengelyben sebességviszszaesést mutattak, míg nemreaktív esetekre a saját mérési eredményeimhez hasonlóan egyértelmű maximum jelentkezett ezen a helyen. A csökkenést a szerzők a berendezés geometriájából adódó recirkuláció hatásaként azonosították.



15. ábra. Cseppek axiális sebessége [m/s].

A porlasztási mechanizmus szempontjából fontos mennyiség a sebességkülönbség a gáz és a cseppek között, ezt ismereti a 16. ábra. A pozitív értékek jelzik, ha a cseppek gyorsabban haladnak, mint az őket körülvevő közeg az adott pontban, általában ez teljesül. Z15 esetén a tengelyben a cseppek lemaradnak a gáztól, míg közepes radiális távolság esetén jóval gyorsabbak nála. Ez a hatás az axiális távolsággal gyengül, majd megfordul: Z45-nél már a tengelyben mutatkozik a legnagyobb relatív sebesség, habár ez már egy lecsökkent érték. A porlasztónyomás növelése erősíti ezt a trendet azzal, hogy a maximális relatív sebesség értéke nő. Ez a kontraszt B100 esetében rajzolódik ki leginkább, a legegyenletesebb radiális sebességeloszlást pedig, akárcsak az SMD-nél, JP8-ra látjuk. Ugyanakkor ez nem igaz a sebesség(különbség)-ingadozás értékére, amely közel azonos minden tüzelőanyagra, mint azt a 17. ábra szemlélteti. Ennek értéke a porlasztónyomással növekszik, azonban a relatív sebességnél látott csúcsértékek helye mellett ez a fluktuáció mindvégig erőteljesen jellemzi a permetet a tengelyben, még negatív sebességeknél is. Chong és tsi. [25] reaktív permetekre történő méréseik során azt tapasztalták, hogy RME és az 50%-os RME/dízel keverék esetében 20 mm axiális távolságnál a sebességek valamivel magasabbak, mint a dízel esetén, amit a párolgást túlélő cseppek nagyobb méretéből adódó nagyobb tehetetlenségének tulajdonítottak. Hasonló eredményre vezettek a

PME-re és JET-A1-re reaktív környezetben végzett méréseik [27]. Habár az állítás valóban látható (16. ábra), ebben az esetben nem valószínű, hogy ez a párolgás hatása miatt alakult ki.

Lowe és tsi. [21] turbulens aceton permeteket és lángokat vizsgálva azt találták, hogy a sűrűbb permetekben a sebességfluktuáció a kifúváshoz közel volt jelentősebb, ez itt is fennáll. Ennek oka a szerzők szerint feltehetően az, hogy a kifúvás környezetében még tart az elsődleges porlasztási folyamat, amely fokozatosan új, kis sebességű cseppeket vezet az áramlásba.



16. ábra. Sebességkülönbség gáz és cseppek között [m/s].



17. ábra. Sebességkülönbség fluktuációja (rms) [m/s].

Urbán és tsi. [17] dízelolaj hideg permetének vizsgálata során megállapították, hogy a jelen dolgozatban alkalmazott porlasztónyomások mellett a sebességmezőt erős axiális áramlás jellemzi (míg a radiális komponens marginális), a porlasztónyomás növekedésével a sebesség növekszik a turbulenciával együtt. Ez a 16. ábra és a 17. ábra alapján összhangban van a reaktív permet esetén mért eredményekkel.

A mért axiális sebességekre szintén illeszthető valószínűségi sűrűségfüggvény, azonban mivel az eredményekben előfordul egyaránt uni- és bimodális eloszlás, a cseppméret eloszlás paramétereire létrehozott térképhez hasonló nem adna megfelelő összevetési alapot az egyes beállításokra. Ezért ebben az esetben pusztán a sebesség hisztogramjának értékeit mutatom be a kiértékelés során. Megemlítendő, hogy Wu és tsi. [19] munkájukban az axiális sebesség eloszlásra, habár az néhány esetben bimodális jelleget mutatott, kielégítő eredménnyel illesztettek normális eloszlást, annak ellenére, hogy ez fizikailag helytelen. Chong és tsi. [23] reaktív permet esetén unimodális sebességeloszlásokat tapasztaltak, melyekre a Normális eloszlás illeszkedett a legjobban.

Az 18. ábra B100 tüzelőanyag permetének sebességeloszlását ábrázolja, 0,6 bar porlasztónyomás mellett, a tengelytől a permetszélig. A radiális változásból megállapítható, hogy a periférián tartózkodó kis számú csepp sebessége egyformán alacsony, jóformán lekövetik a gáz sebességét, mint azt az előző ábrákból is láthattuk. A sebességtartomány a tengely felé haladva kiszélesedik, a sebesség nagysága nő. Z45 mérési pontot leszámítva, azaz kis és közepes axiális távolságoknál, a tengelyben a tartomány kis mértékben újra beszűkül, Z15-nél az eloszlás bimodálissá válik. Ezek a trendek minden tüzelőanyag esetén megfigyelhetőek hasonlóan magas porlasztónyomás mellett. Alacsonyabb porlasztónyomásoknál (0,3 és 0,45 bar) kevesebb esetben figyelhető meg ez a kezdetben két lokális maximummal rendelkező eloszlás. A 19. ábra a jobb szemléltetés kedvéért nem a teljes radiális tartományt, csak a -4 és 0 mm közti mintavételezési pontokat tartalmazza. Fontos megjegyezni, hogy az ábrák nem a relatív sebességet, hanem a cseppek axiális sebességét mutatják. Minthogy minden egyes mérési beállításnál egy gázsebességet határoztam meg, az axiális sebességek és a relatív sebességek eloszlásai ugyanazt mutatják, csupán egy, a lokális gázsebességnek megfelelő értékű, negatív irányú vízszintes eltolással, ezért utóbbit külön nem ábrázolom.



18. ábra. Axiális sebesség eloszlása a kifűvástól távolodva (B100, 0.6 bar).



19. ábra. Axiális sebesség eloszlása különböző tüzelőanyagokra és porlasztónyomásokra (Z15).

#### 3.2.4. CSEPPMÉRET-SEBESSÉG KORRELÁCIÓ

Azon túl, hogy a cseppméret és a sebesség külön-külön függést mutatnak a mérési paraméterektől, érdemes megvizsgálni a két adatsor egymástól való függését, korrelációját is. Ezt mutatja a 20. ábra és a 21. ábra, rendben 0,3 és 0,6 bar porlasztónyomás mellett a tengelyben, a színek a mért cseppek számát mutatják az adott területen. Az ábrákról látható az is, hogy a kifúváshoz közel, Z15 pozícióban lényegesen kevesebb cseppet mértünk, mint a többi pontban. Ez összhangban van a validációs ráta alacsony értékével ezeken a helyeken.

A fekete vonalak a legkisebb négyzetek módszerével illesztett egyenesek, céljuk, hogy a növekvő vagy csökkenő trend könnyebben leolvasható legyen, azonban a korrelációs együtthatók értékéből is látszik, hogy habár értékük az axiális távolsággal növekszik, lineáris kapcsolatról valójában nem beszélhetünk, hasonlóan Wu és tsi. [18] megállapításaihoz. A globális értékelés céljából ezen egyenesek meredekségét (22. ábra) és tengelymetszetét (23. ábra) határoztam meg minden mérési pontra. A tüzelőanyagok között a legjelentősebb különbség, hogy D és JP8 esetén már 0,3 bar-nál is megjelenik egy olyan, kisebb méretű cseppeket felölelő halmaz, amelynek a sebessége jelentősen meghaladja a többi cseppét. Nagyobb porlasztónyomáson (0,6 bar) ez a jelenség már mind a négy tüzelőanyagra látható, és egyre nagyobb a cseppek száma az elkülönülő halmazban. Zaremba és tsi. [20] belső keverésű porlasztók hideg permetére is megfigyelték, hogy előfordulnak olyan viszonylag kis cseppek, amelyek sebessége sokkal nagyobb, mint az adott cseppmérettartományra vonatkozó átlag. A szerzők erre lehetséges magyarázatnak tartották, hogy ha egy adott (jellemzően nagyobb méretű) csepp meghalad egy bizonyos Reynolds számot, akkor a részecske mögött örvények alakulhatnak ki [34], melyek magukkal sodorják a kis Stokes számmal rendelkező (jellemzően kisebb méretű) cseppeket.

A porlasztónyomás növelésével a cseppméret tartomány szűkül, a sebességtartomány pedig kibővül, ahogy azt Wu és tsi. is megfigyelték munkájukban [18]. Reaktív permetekre Chong [25] szintén ezt tapasztalta. A kifúváshoz közel (Z15) a tengelyben a nagyobb méretű cseppek lassabban haladnak, ez a biodízel tartalmú tüzelőanyagokra Z25-nél is fennáll, ezt követően fordul a jelenség és a nagyobb cseppek tesznek szert nagyobb sebességre. A tengelytől távolodva is ez utóbbi trend uralkodik: minél nagyobb a csepp, annál magasabb a sebessége, és ez magasabb porlasztónyomásokon, kisebb axiális távolságoknál (Z15, Z25), különösen a hagyományos tüzelőanyagok permetében még erőteljesebben mutatkozik. Az illesztett egyenes meredekségének előjelváltását Wu és tsi. [18] szintén azonosították egy belső-keverésű porlasztón

vizsgált n-oktán permet értékelése során és összhangban van a Lasheras és tsi. [35] által megállapított, a kifúvás irányában egymást követő régiókkal: (I) gyorsulás, (II) sebesség túllövés, (III) lassulás. A vizsgált permet a negatív meredekségű szakasz vízszintesbe váltása során van az (I), majd a pozitív meredekség kialakulásakor és fennmaradásakor a (II) szakaszban. A (III) szakasz kezdődik 45 mm axiális távolság környékén, hiszen látható, hogy Z35-ről Z45-re már szinte stagnált a meredekség. A régiók a relatív sebességeken (16. ábra) szintén megfigyelhetőek.



20. ábra. Sebesség a cseppméret függvényében (0.3 bar, r = 0 mm)



21. ábra. Sebesség a cseppméret függvényében (0.6 bar, r = 0 mm)

Urbán [17] vizsgálatai során a hideg, dízelolaj permetben is egyértelműen megfigyelhető volt a túllövés jelensége, azaz amikor a cseppek lassabban veszítik el kinetikus energiájukat, mint a gázfázis, ezért a kifúvástól távolodva bizonyos cseppek sebessége nagyobb, mint a gázé. Ezt a jelenséget már Lasheras és tsi. is leírták [35], és a sebesség-cseppméret diagramok alapján a mostani mérésekben is megjelenik az illesztett egyenes meredekségének előjelváltoztatásával: a kisméretű cseppek reprezentálják a gáz mozgását, kezdetben ezek enyhén gyorsabban haladnak, majd azt látjuk, hogy a nagyméretű cseppek sebessége válik nagyobbá az axiális távolsággal. Zaremba és tsi. [20] szintén tapasztalták a túllövés jelenségét mind a négy általuk vizsgált belső keverésű ikeráramú porlasztótípusra. Méréseik során a teljesen kifejlett permetet is (100 mm axiális távolságnál) pozitív meredekségű méret-sebesség összefüggés jellemezte. Reaktív kerozin permetre Hadef és tsi. [28] is megfigyelték ezt a jelenséget.



22. ábra. Illesztett egyenes meredeksége.





Wu és tsi. [18] A cseppméret és a sebesség közötti összefüggést a lebegő átlagsebesség alapján értékelték egy belső keverésű porlasztóra, n-oktán tüzelőanyaggal. A lebegő átlagsebességet Zaremba munkája [20] alapján az alábbi módon határoztak meg:

$$V_f = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=\frac{n}{2}}^{i+\frac{n}{2}} V_i \right),$$
34

ahol *i* jelöli az *i*. cseppet melynek sebessége  $V_i$ , *n* pedig egy rögzített érték, 100. A túllövés jelenségét - a lebegőátlag görbéje egy bizonyos cseppméretig növekedett, majd csökkent - és a porlasztási nyomás növelésével annak erősödését tapasztalták. Az axiális sebességeket a cseppméret függvényében a kifejlett permetre ábrázolva Urbán és tsi. [17] is megfigyelték, hogy a profilok meredeksége a porlasztási nyomással együtt nő, azaz a túllövés jelensége egyre erőteljesebb. Urbán és tsi. [17] ezt azzal magyarázzák, hogy a porlasztónyomás növekedésével a cseppek kisebbé válnak, a sebességingadozásuk pedig nő. A méretcsökkenés és fluktuáció miatt ezek a cseppek könnyebben vesztenek a lendületükből. Ugyanakkor a kiömlési sebesség is nő, azaz a görbék egyre magasabban helyezkednek el, összhangban a 23. ábra eredményeivel. Mind az állítások, mind a magyarázatuk egybeesik azzal, amit a saját, reaktív mérésekre tapasztaltam. Mi több, a gázsebesség fluktuációját, azaz (a módszerből adódóan) a kis cseppek sebességének fluktuációját ábrázoló 14. ábra és az illesztett egyenesek meredekségét megjelenítő 22. ábra között megfigyelhető a hasonlóság, ami igazolja Urbán [17] megállapítását.

Érdemes megjegyezni, hogy Chong és tsi. [27] mérései (mind reaktív, mind nemreaktív) során a nagyobb átmérővel rendelkező cseppek minden axiális távolságnál szignifikánsan lassabbnak bizonyultak, mint kisebb társaik.

A 22. ábra jól mutatja, hogy a hagyományos tüzelőanyagok esetén a permet kezdeti szakaszán a sebesség jóval érzékenyebb a cseppméretre, mint azt B100-nál és B50-nél tapasztaljuk, azonban a kifúvástól távolodva ez az eltérés hamar megszűnik. Ennek lehetséges oka a gázsebességnél D-re és JP8-ra Z15-nél tapasztalt magasabb értékek: a nagyobb kinetikus energiával rendelkező gáz nagyobb sebességváltozási gradienst eredményezett a cseppmérettel. A 23. ábra nem mutat különbséget a tüzelőanyagok között, az axiális távolsággal a sebesség általános lecsengése látható.

Urbán és tsi. [16] értékelték a sebességkomponenseket és a cseppméreteket kifejlett permetekben (60 mm-re a kifúvástól) négy eltérő viszkozitású tüzelőanyagra: vízre, könnyű fűtőolajra, dízelolajra és repceolajra. A szerzők megállapították, hogy a cseppsebesség-változást, mind radiálisan mind axiálisan, elsősorban a nyomás szabályozza; a folyadék típusa és az előmelegítés kisebb hatással vannak rá. A cseppméret csökkenésével az axiális sebesség általánosan csökkent, akárcsak a sebesség-cseppméret ábrákon (20. ábra és 21. ábra) 45 mm axiális távolságnál. A nagy viszkozitású fűtőolaj és repceolaj esetében azonban a sebességeket (radiális és axiális) és a cseppméretet együttesen ábrázoló diagramok jelentősen eltértek a dízel és víz eseteitől. Ez a különbség a fűtőolaj 70 °C-ra való előmelegítésével megszűnt, ugyanis ekkor a viszkozitása nagyságrendileg azonossá vált a 25 °C-os dízelolajéval. (A repceolajnak még 100 °C-on is ennek négyszere a viszkozitása, így arra nem volt igazolható.)

Wu [18] eredményei azt mutatták, hogy a tengelyhez közeli, kis radiális távolsággal jellemzett mintavételezési helyeken ez a sebesség-méret profil (lebegőátlag) közel vízszintes, mivel a helyi gázsebesség viszonylag magas. Azonban a permetszéli régiókban egyértelműen csökkenő ez a függvény, amit azzal magyaráztak, hogy itt a nagyobb cseppek csak korlátozott mértékben képesek felgyorsulni a gázzal történő interakció során. A szerzők első állítását 22. ábra és a 24. ábra is igazolja, azonban ezeken az is jól látszik, hogy ebben az esetben a meredekség a periférián pozitív, ellentétben a második állítással.



24. ábra. Sebesség-cseppméret viszony radiálisan (B100, Z25, 0.3 bar)

#### 3.2.5. VIZUÁLIS ÉRTÉKELÉS

Lowe és tsi. [21] turbulens aceton permeteket és lángokat vizsgáltak nagysebességű képalkotással. Ez alapján három geometriát választottak szét - cseppeket, szalagokat és "szabálytalan" alakzatokat – melyek fejlődését a tengely mentén statisztikai eszközökkel értékelték. Eredményeik alapján az imént említett "szabálytalan" geometriák lényegesen kisebb számban fordulnak elő, mint a szalagos struktúrák. Arra az esetre, amikor a recessziós hossz nulla, sikerült az ép tüzelőanyag-mag teljes lebomlását megfigyelniük, ezt a 25. ábra mutatja. A folyadéklevegő határfelületen x/D = 0,13 és 1 között láthatóak az elsődleges instabilitások, amelyek nagyságrendileg azonos méretűek a folyadékmagról leváló részekkel. 25 mm-es recessziós hossznál a képek még mindig mutatnak részlegesen elporladt struktúrákat, 80 mm esetén pedig már nem figyelhető meg porlasztási folyamat, habár maradnak nem gömbszimmetrikus cseppek. Azaz a recessziós hossz növelése (egyre hígabb permet létrejötte) a szalagok és a "szabálytalan" geometriák kisebb populációját eredményezi, és ennek megfelelően nő a nagyobb cseppek száma a kifúvásnál. A reaktív és nem-reaktív permeteket összehasonlítva a szerzők megállapították, hogy a kifúvásnál a tengelyben csak pár százalék eltérés adódik a különböző folyadékgeometriák arányában, azaz a hőfelszabadulás hatása elhanyagolható.



25. ábra. Aceton permet felbomlása [21].

A szerzők PDA mérések alapján megállapították, hogy a másodlagos porlasztás nem dominál a permet középvonalában, mivel a cseppek mérete csak enyhén csökkenő trendet mutat. Híg permetekben és lángokban a kisebb cseppek elpárolgása miatt a cseppek átlagos átmérőjének kezdeti növekedése lenne várható, ezzel szemben a szerzők által vizsgált sűrűbb permetek szinte állandó értéket mutatnak, amit a fragmentálódó szalagokból és "szabálytalan" folyadékcsomagokból származó folyamatos csepputánpótlásnak tulajdonítanak. A saját eredményeimben a 7. ábra alapján B100-nál tapasztalt enyhe méretbeli növekedés nem tulajdonítható a párolgásnak, hiszen a nála jóval illékonyabb tüzelőanyagok (D és JP8) esetén ugyanolyan körülmények között nem mutatkozott növekedés.

Lowe eredményei egyértelműen azt mutatták, hogy a szalagok és szabálytalan alakzatok mérete és száma a kilépési Weber számmal és a tartózkodási idővel csökkent. A kiértékelés alapján folyadékstruktúrák összfelülete a folyadékbejuttatás pontjától körülbelül két permetsugár-átmérőre tetőzött, és a teljes porlasztási folyamat körülbelül hét átmérőre fejeződött be.

A 26. ábra dízelolaj hideg permetét ábrázolja négy egymást követő időpillanatban, különböző porlasztónyomások mellett. Habár e dolgozat kereteit meghaladja az olyan részletes értékelés, amit Lowe és tsi. folytattak, az ábráról megállapítható, hogy még kis viszkozitású folyadék esetén sem biztosít a 0,3 bar porlasztónyomás megfelelően finom permetet. Minél kisebb a por-

lasztónyomás, a folyadéksugár annál koncentráltabb a kifúvásnál, majd szabálytalan alakú folyadéktömegekre szakad szét, melyek jól megfigyelhetők 0,3 bar esetén. 0,6 bar porlasztónyomás mellett még mindig látható durvább tüzelőanyag felszakadás, azonban már lényegesen kisebb területen, mint 0,3 bar esetén. Igazán egyenletes és finom permetet 0.9 bar porlasztónyomás képes létrehozni. A magasabb porlasztónyomás egyúttal hígabb permetet is jelent, tehát a Lowe által készített felvételek eredményei összhangban vannak a dízel permet eredményeivel. Mindez a biodízel tartalmú folyadékokra nagyobb viszkozitásuk miatt még nagyobb nyomás mellett igaz csak. Azonban fontos kiemelni, hogy a képek egy korábbi, az általam vizsgált porlasztóhoz meglehetősen hasonló berendezéssel létrehozott permetet ábrázolnak nemreaktív környezetben, míg jelen dolgozatban a fúvókából kilépő közeg egy forró (250 °C-os) légáramba expandál, ami jelentősen lecsökkenti a hideg állapothoz képest a folyadékviszkozitást, ezzel segítve az egyenletesebb permet kialakulását.



26. ábra. Dízelolaj permete nem reaktív környezetben.

## 4. CSEPPEK APRÓZÓDÁSA ÉS ÖSSZEOLVADÁSA

Ebben a fejezetben a tényleges csepphalmaz kialakításában részt vevő folyamatokat ismertetek, mint a cseppek felszakadása, illetve a cseppek összeolvadása.

#### 4.1. Cseppaprózódás

Az 3. fejezet legelején tárgyalt három elsődleges porlasztási folyamat bármelyike során létrejött cseppek az őket körülvevő, tőlük eltérő sebességgel áramló közeg hatására továbbaprózódhatnak. Ezt a folyamatot nevezzük másodlagos porlasztásnak. Lane [36] kísérletileg kimutatta, Hinze [37] pedig elméleti úton megerősítette, hogy a folyadékcsomagok szétesésének módja attól függ, hogy ezek egyenletes gyorsulásnak van-e kitéve, vagy pedig hirtelen nagy sebességű gázáramba kerülnek. Állandó gyorsulás esetén a csepp egyre inkább ellaposodik, és egy kritikus relatív sebességnél egy nagyjából kör alakú peremhez rögzített üreges zsák formájára fújódik fel. A széteséskor a zsákból nagyon finom cseppek sokasága keletkezik, míg a perem, amely az eredeti csepp tömegének legalább 70%-át tartalmazza, nagyobb cseppekre bomlik [38]. A hirtelen gyors légáramnak kitett csepp teljesen más módon esik szét. Ahelyett, hogy a peremhez rögzített vékony üreges zsák alakulna ki, a csepp az ellenkező irányba deformálódik, és domború felületet hoz létre. A csészealj forma szélei vékony szalagokká válnak, amelyek cseppekre szakadnak [38].

A mért sebességeket klasszikusan felbonthatjuk egy átlagos és egy fluktuáló komponensre. Így a folyadékcseppre ható erő kifejezhető a csepp és a gáz közötti átlagos relatív sebességből és a turbulencia-ingadozásból eredő erők összegeként. Ezért az e két erő által okozott aprózódást általában nyírási és turbulens cseppaprózódásként különböztetik meg [18].

#### 4.1.1. NYÍRÁSON ALAPULÓ CSEPPAPRÓZÓDÁS

A folyamat leírására az ellenálláserő (torlóerő) és a kohéziós erő viszonyát megadó Weber szám (We) használatos. Aerodinamikai erők hatására akkor következhet be egy csepp to-vábbaprózódása, ha a csepp és az azt körülvevő áramló közeg közötti sebességkülönbség miatt az ellenálláserő túllépi a felületi feszültségből adódó kohéziós erőt [38]. Ez az (1) egyenlettel fejezhető ki:

$$C_e \frac{D^2 \pi}{4} \frac{\rho_p}{2} w^2 \ge \sigma D \pi. \tag{1}$$

Átrendezve:

We = 
$$\frac{D\rho_p w^2}{\sigma} \ge \frac{8}{C_e} = We_{cr}$$
, (2)

ahol We<sub>cr</sub> a kritikus Weber szám,  $C_e$  az ellenállástényező, D a cseppátmérő,  $\rho_p$  a porlasztóközeg sűrűsége, w a csepp sebessége a porlasztóközeghez képest. A (2) egyenletből kifejezhető a kritikus cseppméret is:

$$D_{cr} = \frac{We_{cr}\sigma}{\rho_p w^2}.$$
(3)

Vagyis a kritikus átmérőnél kisebb átmérőjű cseppek (a többi paraméter változatlansága mellett) elméletileg már nem apríthatóak tovább. A kritikus Weber szám értékét többen tapasztalati úton határozták meg. Például [14] alapján alacsony viszkozitású (Oh  $\approx$  0, ahol az Ohnesorgeszámot a cseppátmérővel kell meghatározni) egyedi cseppekre:

- •Szabadon eső cseppre:  $We_{cr} = 22$
- •Nagy sebességkülönbség esetén:  $We_{cr} = 13$

Viszkózus tüzelőanyagokra (Oh  $\neq$  0) a szakirodalomban általában az Oh számtól függő, korrigált értékeket használnak, például a [14] formában:

$$We_{cr}^* = We_{cr} + a \cdot Oh^b.$$
<sup>(4)</sup>

Az irodalom azonban megjegyzi, hogy az Ohnesorge számtól való függés még nem tekinthető teljesen tisztázottnak [14].

#### 4.1.2. TURBULENS CSEPPAPRÓZÓDÁS

Hasonlóan a nyíráson alapuló folyamathoz, ebben az esetben is definiálható egy kritikus We, amiben itt a sebesség átlagértéke helyett a turbulens fluktuációt kell figyelembe venni. Lasheras és tsi. [35] erre a (5) összefüggést ajánlották:

$$We_{t} = \frac{2\rho_{p}\varepsilon^{\frac{2}{3}}D^{\frac{5}{3}}}{\sigma},$$
(5)

ahol  $\varepsilon$  a turbulens disszipációs ráta, melynek értéke a turbulens kinetikus energiával (*TKE*) és az *l* turbulens hosszléptékkel kifejezve:

$$\varepsilon = \frac{TKE^{\frac{3}{2}}}{l},\tag{6}$$

#### 4.1.3. CSEPPAPRÓZÓDÁS A VIZSGÁLT PERMETBEN

A (3) és (5) egyenletek alapján összevontan is meghatározható az a maximális cseppméret, amely alatt a csepp még nem megy keresztül másodlagos porlasztási folyamaton:

$$D_{max} = \min\left\{\frac{\sigma We_{s,cr}}{\rho_p w^2}, \left(\frac{\sigma We_{t,cr}}{\rho_p}\right)^{\frac{3}{5}} \varepsilon^{-\frac{2}{5}}\right\}.$$
(7)

Urbán és tsi. [17] dízelolajra We<sub>cr</sub> = 12 és We<sub>cr,turb</sub> = 0,59 értékeket használták a cseppek aprózódásának számítására Hinze [37] és Lefebvre [38] munkái alapján, a turbulens hosszléptéket pedig a fűvóka hidraulikus átmérőjének 3,8% - aként számították Birch és Morrison [39] eredményei alapján. Ezeket irányadó értékként véve saját eredményeimre szintén meghatároztam  $D_{max}$  értékét, az aprózódás módját, illetve, hogy a cseppek hányadára teljesül az aprózódás elsődleges feltétele. Ugyanis, ha a cseppre ható aerodinamikai erő az aprózódási idő alatt lecsökken, előfordulhat, hogy nem következik be a csepp felszakadása, akkor sem, ha ez az erő kezdetben elég nagy volt hozzá [38].  $D_{max}$  értékét elsősorban a nyíráson alapuló cseppaprózódás határozta meg, a turbulens aprózódás lehetősége csak a kis axiális távolságokban, a permet szélén jelentkezett. Ezt ábrázolja a 27. ábra különböző beállításokra.



Mindazonáltal a továbbaprózódó cseppek száma minden mintavételezési pontban, minden beállítás mellett kevesebb, mint 0,1%, ezért külön nem ábrázolom. Habár a kritikus Weber szám meghatározása bizonytalanságot visz a számításba, a kapott, meglehetősen alacsony értékek miatt nagy biztossággal megállapítható, hogy a cseppek továbbaprózódása csak elenyésző mértékben van jelen a permetben.

#### 4.2. Cseppek összeolvadása

A környező gáz turbulenciája a cseppek ütközéséhez és ezáltal az összeolvadás lehetőségéhez vezet, amelyhez azonban megfelelő mennyiségű kinetikus energiára van szükség. Amikor két csepp összeütközik köztük vékony légréteg képződik, amely párnaként működik, és a cseppek egymásról történő visszapattanását okozhatja. Ha az ütközéssel járó idő kellően nagy, a cseppeket elválasztó filmréteg fokozatosan egy bizonyos küszöbérték alá vékonyodik, és a két csepp összeolvad. Ezzel szemben, ha a környező gáz turbulenciája kellően intenzív, a cseppek ütközésével járó idő rövidebb, mint a film elvékonyodásához szükséges idő, és a cseppek összeolvadás nélkül visszapattannak [40].

Az összeolvadás folyamata során tehát a permetben fogyhatnak a kis méretű cseppek és nőhet a nagyméretűek száma, ami az *SMD* növekedéséhez vezet. Ezt csak csekély mértékben figyeltem meg a 7. ábra kapcsán, így a cseppek összeolvadásának elhanyagolása feltételezhető. Fontos megjegyezni továbbá, hogy a megfigyelt kismértékű *SMD* növekedésnek jóval valószínűbb oka a nem gömb geometriájú folyadékstruktúrák felbomlása az axiális távolsággal viszonylag nagy cseppekké, mely az elsődleges porlasztási folyamat vége, amelyek jelenlétére az utal, hogy Z15 távolságnál jóval kevesebb a cseppek száma, különösen B100 esetén, 0,3 bar porlasztónyomás mellett, amit a 20. ábra mutat. Az összeolvadás helyes kvanitatív értékeléshez a folyamat összetettsége miatt mélyebb vizsgálatra van szükség, ami meghaladja ennek a dolgozatnak a kereteit, azonban továbbhaladási irányként azonosítható.

## 5. A PERMET PÁROLGÁSÁNAK MODELLEZÉSE

Reaktív permetek vizsgálata esetén elkerülhetetlen a párolgás hatásának értékelése, ezért ebben a fejezetben egy rövid szakirodalmi áttekintés és az alkalmazott modell bemutatása után ennek vizsgálata következik.

#### 5.1. Szakirodalmi áttekintés a párolgás modellezésének témakörében

A párolgás folyamata számos területen megjelenik (kromatográfia, spektroszkópia, szárítás, tüzeléstechnika stb.), így a számíthatóság érdekében szükségessé vált a párolgási modellek megalkotása, melyek köre az idő múlásával fokozatosan bővült. Napjainkban már számos analitikus és numerikus modellt ismerünk, amelyekből a vizsgálandó probléma jellemzői alapján válogathatunk.

A klasszikus modelleket egykomponensű folyadékokra a [41] forrás ismerteti. Az egyik legkorábban megalkotott párolgási modell a  $D^2$ -törvény, amelyet Maxwell hozott létre 1877-ben. Ezt Abramzon and Sirignano finomította, akik a konvektív hő- és tömegátadást az ún. filmelmélet felhasználásával vették figyelembe. Ennek lényegi feltevése, hogy a filmben a hővezetés vagy diffúzió útján történő tisztán molekuláris transzport sebességének meg kell egyeznie a cseppfelület és a külső áramlás közötti konvektív hő- vagy tömegátadás tényleges intenzitásával. Ezenkívül figyelembe vették a hősugárzást, illetve a cseppek belsejében kialakuló tüzelőanyag-cirkuláció hatását. Ehhez a modellhez hasonlót mutatott be Yao, Abdel-Khalik, and Ghiaasiaan, azonban számításba veszik, hogy a határrétegek vastagsága véges. Az eddig említett 3 modellt mind a tömeg-, energia- és impulzusmegmaradási törvényekből vezették le, sok helyen egyszerűsítéseket alkalmazva, például a sűrűségekre és hőmérsékletekre, diffúziós együtthatókra stb. Tonini and Cossali új modellt dolgoztak ki gömbszimmetrikus, egykomponensű csepp zavartalan levegőben történő párolgására, melyben kevésbé szigorú feltevésekre van szükség. A gázfázisra helyezték a hangsúlyt, feltették, hogy a csepp belsejében nincs hőmérsékleti gradiens és hogy a folyadék hővezetési tényezője végtelen nagy. A modell a cseppet körbevevő levegő-gőz keverékre felírt stacionárius tömeg-, energia- és impulzusmegmaradási törvényeken alapul.

A gyakorlat legtöbbször nem korlátozódik az egykomponensű anyagok alkalmazására, azonban több komponens esetén azok eltérő párolgási sebessége koncentráció gradienst hoz létre a folyadékban, ezzel bonyolultabbá téve a modellezést. Korai egyszerűbb megoldásokat erre a [42,43] források taglalják, emellett ilyenek még például a Discrete Component Model (DCM) kis számú komponensre, vagy a Distillation Curve Model és Continuous Thermodynamics modell összetettebb anyagokra. Napjainkban fejlesztett modelleket mutatnak be a [44,45] források, az első a DCM numerikus változata, mely kis számú komponens esetén használható jól, míg a második az ún. kvázidiszkrét modell, ami akár nagyobb számú összetevőt tartalmazó folyadékok párolgásának számítására is alkalmas. A legfrissebb kutatási eredményeket a párolgás modellezésének terén [46] hasonlítja és foglalja össze.

Azonban ezekben a modellekben is számos helyen találunk megoldatlan problémákat, melyek kiküszöbölése további kutatásokra, fejlesztésekre vár, ilyenek például a következők [46]:

A legtöbb modell gömbszimmetrikus cseppek párolgására készült. Habár már léteznek modellek, melyek eltérnek ettől, azok is csak a gömb geometriától való kis eltérés, esetleg hengeres alak esetén használhatók, de így is sokkal bonyolultabb összefüggéseket eredményeznek. Valószínűleg ezt a problémát csak nagy kapacitásokat igénylő számítógépes numerikus szimulációk fogják megoldani. A cseppek mozgását is figyelembe vevő modell az ún. ETC/ED (Effective Thermal Conductivity / Effective Diffusivity) modell, azonban a validálása szélesebb paramétertartományokra még zajlik. A felmelegedésre és a párolgásra a cseppek közötti kölcsönhatás is kifejti hatását, még akkor is, ha csupán kellően közel (ha a távolság és a cseppátmérő aránya kisebb, mint 10), egymás mellett mozognak. Habár az egyszerűbb esetekre léteznek félempirikus közelítések, azok nagy számú cseppek és összetett kölcsönhatások esetén nem működnek. Azt már megállapították, hogy minél sűrűbb a permet (minél nagyobb a cseppek térfogategységenkénti száma), annál kisebb a párolgási sebesség, azonban a pontos modellezése jelenleg is nyitott kérdés. Több gyakorlati alkalmazásban (például belső égésű motorokban) a tüzelőanyag nyomása és hőmérséklete a kritikus fölé emelkedik, bár a modellek többsége nem alkalmazható kritikushoz közeli, vagy transz- és szuperkritikus körülmények közt lejátszódó párolgás számítására. Ilyenkor a párolgás látens hője nullává válik, eltűnik a különbség a folyadék és gázfázis között, így a felületi feszültség is, illetve a termodinamikai jellemzők erősen érzékennyé és nemlineárissá válnak a hőmérséklet- és nyomásváltozásokra. Ezeket a különleges kondíciókat a modellezés során is figyelembe kell venni. A többkomponensű anyagok modellezésére jó lehetőséget nyújt a már említett kvázidiszkrét modell, azonban még ebben is számos egyszerűsített megoldás van jelen, például, hogy az alkotók diffúziós együtthatóit egyenlőnek veszi, illetve, hogy csak gömbszimmetrikus cseppek párolgásának vizsgálatára lett kifejlesztve, így ezek a kiegészítések még hátra vannak. A párolgási együtthatóra gyakorolt kvantumkémiai hatás mértéke még kérdéses, értékelni fejlett kinetikai és molekuladinamikai modellekkel lehetséges, melyek jelenleg még a műszaki alkalmazásokhoz is túl durva közelítéseket alkalmaznak, így fejlesztésre várnak.

Ugyanakkor nem csak a modellek maguk, hanem a bemeneti paramétereknek, a tüzelőanyagok termofizikai jellemzőinek pontos megadása is befolyásolhatja a kapott eredményeket, ezt vizsgálja [1]. Az érzékenységi vizsgálat alapján kijelenthető, hogy a párolgás különösen érzékeny a következő paraméterekre: a látens párolgási hőre, forráspontra, a folyadék sűrűségére és a gőz hővezető képességére. A gőz dinamikus viszkozitása, a gőz sűrűsége és a folyékony tüzelőanyag fajhője az elemzett körülmények között marginális hatással volt a párolgási időre, míg a kritikus hőmérséklet és a gőz fajhője csekély mértékben befolyásolta a jelenséget.

#### 5.2. Helyettesítő keverékek

Az előbb leírt gondolatok alapján könnyen belátható, hogy a permetben zajló folyamatok modellezéséhez szükség van a tüzelőanyagok viselkedését, anyagi jellemzőit jól leíró anyagmodellre. Minthogy az általam mért tüzelőanyagok egyenként akár több száz komponensből is állhatnak, a valós összetételt nem lehet és a számítási kapacitások végessége miatt nem érdemes alkalmazni semmilyen numerikus modellben vagy szimulációban. Csemány és Vámos [47] korábbi munkájának köszönhetően D és B100 tüzelőanyagokra ismertek a mért anyagjellemzőkkel validált helyettesítő keverékek, melyek a komponensek számát lecsökkentve is jól modellezik az eredeti tüzelőanyagok tulajdonságait. Ezek komponenseit és a komponensek arányait mutatja a 6. táblázat és a 7. táblázat. (Dízelolaj esetén a szakirodalomban gyakran használt egykomponensű helyettesítő anyag még a normál-dodekán (C<sub>10</sub>H<sub>26</sub>).)

Komponens neve	Összegképlet	Mólarány [-]
N-hexadekán	$C_{16}H_{34}$	0,3651
N-oktadekán	$C_{18}H_{38}$	0,2646
Izocetán	$C_{16}H_{34}$	0,0345
Dekalin	$C_{10}H_{18}$	0,1734
Toluol	$C_7H_8$	0,0290
1-metilnaftalin	$C_{11}H_{10}$	0,0431
Butil-ciklohexán	$C_{10}H_{20}$	0,0480
Biciklohexil	$C_{12}H_{22}$	0,0423

6. táblázat. Dízelolaj 8 komponensű helyettesítő keveréke.

Zsírsav-észter komponens	Tömegarány (%)
C14:0	0,31
C16:0	12,77
C16:1	0,31
C18:0	3,50
C18:1	46,96
C18:2	31,72
C18:3	2,57
C20:0	0,41
C20:1	0,62
C22:0	0,51
C24:0	0,21
C24:1	0,11

7. táblázat. B100 helyettesítő keverékének komponens összetétele.

#### 5.3. Az alkalmazott modell

A folytonos modellhez egy MATLAB környezetben Csemány által készített kódot használok, amelyet korábban már sikeresen alkalmaztak egyedi cseppek párolgásának számítására [11,12]. A modell alapgondolatai az ANSYS Fluent szimulációs szoftverben alkalmazott elméleti megfontolásokon [48], illetve a [41,49,50] irodalmakon alapulnak, az alkalmazott egyenletek ugyanitt fellelhetőek.

#### 5.3.1. Egykomponensű modell áttekintő ismertetése

A modell a NIST WebBook [51] oldaláról lekéri a tüzelőanyag és a levegő összetevőinek (oxigén, nitrogén) szükséges jellemzőit a nyomás, illetve hőmérséklet függvényében, ha szükséges interpolál. Ezek a jellemzők a látens hő, forráspont, sűrűség, fajhő, dinamikai viszkozitás és a hővezetési tényező, utóbbiak a tüzelőanyag esetén mind folyadék, mind gőz halmazállapotra. A kezdeti- és peremfeltételek számunkra megfelelő beállítása után a modell minden időlépésben tömeg- és hőátvitelt, majd ebből egy új cseppátmérőt számol, egészen a megadott kilépő feltételig, amely ebben az esetben a PDA mérés sebességadataiból számolt tartózkodási idő elérése, vagy a csepp elfogyása (az átmérő 0-vá, vagy negatívvá válik az adott lépésben). A hőegyensúlyban a modell figyelembe veszi a konvektív és a sugárzásos hőáramokat is.

#### 5.3.2. Többkomponensű modell áttekintő ismertetése

A megfontolások az egykomponensű modellhez hasonlóak: a hő- és anyagtranszport leírásával minden lépésben megtörténik az új átmérő meghatározása, azonban ebben az esetben az összetétel is megváltozik, tehát a modell az új komponens arányokat is definiálja. A NIST WebBook, habár sok anyagra vonatkozóan tartalmaz adatokat, a folyékony tüzelőanyagok jellemzői gyakran nem találhatóak meg sem az adatbázisban, sem más irodalomban (például a B100-at alkotó zsírsav-észterek jellemzői sem). Ezért a többkomponensű modell a komponensek anyagi jellemzőinek meghatározását különböző becslési módszerekkel végzi, melyeket a [49] cikk részletez. Számításaimat ezzel a modellel, a 6. táblázatban és a 7. táblázatban megtalálható komponensekkel és arányokkal végeztem.

#### 5.4. Párolgás a vizsgált permetben

A 2.1. fejezetben bemutatott égőkialakítás alapján látható, hogy a permetet egy forró, 250 °Cra előmelegített légáram veszi körbe, ezért indokolt a párolgás hatásának vizsgálata. A párolgás számítását a Z25 és Z45 közötti szakaszon végeztem. Ennek oka, hogy Z15 és Z25 között feltehetően még sok új csepp jelenik meg, amik ellehetetlenítik a párolgás hatásának értékelését. A számításokban egységesen 50 °C-os kezdeti tüzelőanyaghőmérsékletet becsültem, ugyanis nagyságrendileg ez az eredmény adódik a modell hőtani egyenletei alapján a Z25-nél lévő csepphőmérsékletre, amennyiben azt feltételezem, hogy a kilépésnél 25 °C hőmérsékletű volt. A pontos meghatározás számítás útján körülményes lenne, magas bizonytalansággal járna, ezért ez mérés útján fog megtörténni, egyelőre azonban nem áll rendelkezésre a szükséges mérési adat.

A párolgási számítások értékeit a 28. ábra mutatja D esetére, a 29. ábra pedig B100 esetére. Mindkét ábra a tengelyben (r = 0 mm) mért adatokra vonatkozik. A hisztogramokon látható "hézagok" oka, hogy a modell bemenetei diszkrét értékek, sűrítésükkel ez kiküszöbölhető, azonban az jelentősen megnöveli a számítási időt. D esetére a számítás jó közelítést ad, bár enyhén túlbecsüli a szélsőértékeket, és alul a hisztogram középső tartományát. Ugyanakkor ez nem mondható el B100-ra: a permetben ebben az esetben a valóságban jóval kisebb cseppméretek vannak jelen, mint azt a modell jelzi. Ennek oka lehet maga a modell bizonytalansága, vagy az, hogy a permetben a párolgáson túl van egy domináns folyamat, ami a cseppméretcsökkenést okozza és amit nem vettem figyelembe. Ennek további vizsgálata szükséges a jövőben.



28. ábra. D párolgása a tengelyben.



29. ábra. B100 párolgása a tengelyben.

## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

Dolgozatom célja, hogy átfogó értékelést nyújtsak egy egyszerű sugaras levegő segédközeges porlasztó által létrehozott permetben kialakuló folyamatokról reaktív környezetben, ezzel segítve a folyadéktüzelés modellezését és annak validációját. Ehhez részletesen kiértékeltem a Fázis Doppler Anemométer (PDA) segítségével szimultán mért axiális sebességeket és cseppméreteket, az eredményeimet összevetettem a szakirodalommal (3. fejezet), ezt követően pedig a permetben lejátszódó folyamatokat vettem vizsgálat alá, mint a cseppek aprózódása, összeolvadása és a párolgás (4. és 5. fejezet). Mindezek során az alábbi megállapításokra jutottam:

- (1) A validációs ráta értéke 15 mm és 25 mm-es axiális távolságoknál alacsony, azaz az itt mért értékek nem jellemzik a permet egészét, hiszen a szabálytalan folyadéktömegekről, szalagokról nem adnak információt, annak ellenére, hogy azok jelentős mértékben jelen vannak. A validációs ráta sorban JP8-ra, D-re, B50-re majd B100-a egyre kisebbé válik, azaz egyre kisebb a nem gömb alakú folyadékstruktúrák részaránya. Ez a sorrend egybeesik a növekvő viszkozitás és felületi feszültség értékekkel.
- (2) Az SMD értéke JP8-ra, D-re, B50-re és B100-ra sorban növekszik, megfelelően a növekvő viszkozitás és felületi feszültség értékeknek, a porlasztónyomás növelésével pedig mindenkor csökken. B100 és B50 nagyobb méretcsökkenési gradienst mutatnak az axiális távolsággal, mint a hagyományos tüzelőanyagok. A permet tengelyében és a szélén magasabb a cseppméret, utóbbi feltehetően a nagyobb cseppek kisodródásának köszönhető. Másodlagos porlasztás jele nem mutatkozik az SMD ábráján, ezt az ezzel kapcsolatos számítások is igazolták.
- (3) A cseppméretre illesztett eloszlásra vonatkozó eredmények több pontban eltérnek a nemreaktív szakirodalmi eredményektől (Urbán [15]). A legjobb átlagos illesztési értékkel a GEV (Generalized Extreme Value) eloszlás rendelkezett, habár kis axiális távolságoknál a permet tengelyének közelében a Burr eloszlás sokszor felülmúlta. A kétparaméteres eloszlások közül a legjobb háromnak a Gamma, a Nakagami és a Lognormális bizonyultak, ebben a sorrendben. Az illesztés a porlasztónyomás növelésével és radiálisan a permet széle felé haladva egyre jobbnak adódott.
- (4) A cseppméretre illesztett Gamma eloszlásokról elmondhatóak az alábbiak: Z15 esetén a legnagyobb radiális távolságnál tapasztaltam a legkisebb cseppméreteket és cseppmérettartományt, a tengely felé haladva mindkét érték fokozatosan nőtt. Z25 és Z35 esetén a legkisebb méret és legszűkebb tartomány a permet széle és a tengely között félúton, közepes

radiális távolságoknál található, Z45 esetén pedig az eloszlások majdhogynem egybeesnek. A Gamma eloszlás várható értéke és szórásnégyzete is csökken a porlasztónyomás növelésével, tehát a permet itt a leginkább monodiszperz, és itt a legkisebbek a cseppméretek. A várható érték és a szórásnégyzet rendben csökken B100, B50, D és JP8 esetére, azaz biodízel tartalom esetén a permet szélesebb cseppméret-tartományt ölel fel, nagyobb cseppméretekkel.

- (5) A gázsebesség egyértelműen csökken a kifúvástól távolodva, csakúgy, mint a porlasztónyomás csökkenésével és a radiális távolsággal. A gázsebesség fluktuációja eleinte (Z15, Z25) a tengely mellett maximális, magában a tengelyben alacsonyabb, de a két csúcs az axiális távolság növelésével (Z35, Z45) középen eggyé olvad össze.
- (6) A cseppek axiális sebessége a tengelyben maximális, a porlasztónyomás, illetve a radiális és axiális távolság növelésével értéke csökken. Z15 esetén a tengelyben a cseppek lemaradnak a gáztól, míg közepes radiális távolság esetén jóval gyorsabbak nála. Ez a hatás az axiális távolsággal gyengül, majd megfordul: Z45-nél már a tengelyben mutatkozik a legnagyobb relatív sebesség, habár ez már egy lecsökkent érték. Ez a kontraszt B100 esetében rajzolódik ki leginkább, a legegyenletesebb radiális sebességeloszlást pedig, akárcsak az *SMD*-nél, JP8-ra látjuk. Ugyanakkor ez nem igaz a sebesség(különbség)-ingadozás értékére, amely közel azonos minden tüzelőanyagra. Ennek értéke a porlasztónyomással növekszik, azonban a relatív sebességnél látott csúcsértékek helye mellett ez a fluktuáció mindvégig erőteljesen jellemzi a permetet a tengelyben. A fluktuáció mértéke a porlasztónyomás növelésével szintén növekszik.
- (7) Az axiális sebesség eloszlásának radiális változásból megállapítható, hogy a periférián tartózkodó kis számú csepp sebessége egyformán alacsony, jóformán lekövetik a gáz sebességét. A sebességtartomány a tengely felé haladva kiszélesedik, a sebesség nagysága nő. Z45 mérési pontot leszámítva, azaz kis és közepes axiális távolságoknál, a tengelyben a tartomány kis mértékben újra beszűkül, Z15-nél az eloszlás bimodálissá válik. Ez utóbbi jelenség jellemzően nagyobb porlasztónyomások (0,6 és 0,75 bar) esetén fordul elő.
- (8) A cseppméret és a sebesség viszonyáról a következők fogalmazhatóak meg: A tüzelőanyagok között a legjelentősebb különbség, hogy D és JP8 esetén már 0,3 bar-nál is megjelenik egy olyan, kisebb méretű cseppeket felölelő halmaz, amelynek a sebessége jelentősen meghaladja a többi cseppét. Nagyobb porlasztónyomáson (0,6 bar) ez a jelenség már mind a négy tüzelőanyagra látható, és egyre nagyobb a cseppek száma az elkülönülő halmazban.

Zaremba és tsi. [20] erre lehetséges magyarázatnak tartották, hogy ha egy adott (jellemzően nagyobb méretű) csepp meghalad egy bizonyos Reynolds számot, akkor a részecske mögött örvények alakulhatnak ki [34], melyek magukkal sodorják a kis Stokes számmal rendelkező (jellemzően kisebb méretű) cseppeket. A porlasztónyomás növelésével a cseppméret tartomány szűkül, a sebességtartomány pedig kibővül. A permetben megfigyelhetők a Lasheras és tsi. [35] által megállapított, a kifúvás irányában egymást követő régiók: (I) gyorsulás, (II) sebesség túllövés, (III) lassulás. Az illesztett egyenesek meredeksége és a kisebb méretű cseppek sebességének fluktuációja között hasonlóság látszik. Urbán és tsi. [17] megállapításai alapján ezt feltehetően az okozza, hogy a fluktuáció miatt a kisebb cseppek könnyebben vesztenek a lendületükből. Emiatt nagyobb porlasztónyomások (nagyobb fluktuáció) esetén is magasabb meredekség értékeket tapasztaltam, illetve a kiömlési sebesség is nő, azaz az egyenesek egyre magasabban helyezkednek el.

- (9) A permetben a cseppeknek csak elenyésző hányada aprózódik tovább. Amennyiben ez nem így lenne, a maximális cseppméretet a nyírásos aprózódás határozná meg.
- (10) A párolgási modell eredményei D esetére kielégítőek, ám B100 esetén a párolgás és egyéb permetben lejátszódó folyamatok vizsgálata szükséges a továbbiakban.

Úgy vélem, sikerült átfogó képet alkotnom a permetben zajló folyamatokról, amennyire azt a PDA mérés lehetővé tette. Azonban ezt a későbbiekben mindenképpen érdemes kiegészíteni nagysebességű kamerával rögzített felvételek elemzésével, amely információt szolgáltat a PDA által nem mért nem gömbszerű folyadékstruktúrákról. Ez segítség lehet a cseppek összeolvadásának értékelésében is. Az aprózódás tekintetében a kritikus Weber-szám meghatározásának részletesebb vizsgálata, például korrigált érték meghatározása a nagyobb viszkozitású anyagokra, javíthat a modellezés pontosságán. A párolgás számítása szempontjából már az előbb felsoroltak megváltoztatják a modell bemeneteit, azonban a tüzelőanyag cseppek hőmérsékletének meghatározása mérési adatokból csökkentené a számítás bizonytalanságát.

## 7. IRODALOMJEGYZÉK

- Csemány D, Józsa V. Fuel Evaporation in an Atmospheric Premixed Burner: Sensitivity Analysis and Spray Vaporization. Processes 2017;5:80. https://doi.org/10.3390/pr5040080.
- [2] Marchione T, Allouis C, Amoresano A, Beretta F. Experimental Investigation of a Pressure Swirl Atomizer Spray. J Propuls Power 2007;23:1096–101. https://doi.org/10.2514/1.28513.
- [3] Urbán A, Zaremba M, Malý M, Józsa V, Jedelský J. Droplet dynamics and size characterization of high-velocity airblast atomization. International Journal of Multiphase Flow 2017;95:1–11. https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.02.001.
- [4] H.-E. Albrecht M. Borys N. Damaschke c. Tropea. Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques Springer. Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2003. https://doi.org/10.1007/978-3-662-05165-8.
- [5] Global fuel supply by scenario, 2010-2040 Charts Data & Statistics IEA n.d. https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-fuel-supply-by-scenario-2010-2040 (Utolsó elérés 2021.10.22.).
- [6] European Commission. Proposal for a regulation of the european parliament and of the council on ensuring a level playing field for sustainable air transport n.d. https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/refueleu\_aviation\_-\_sustainable\_aviation\_fuels.pdf (Utolsó elérés 2021.10.25.).
- [7] H.-G. Chen and Y.-H. P. Zhang. New biorefineries and sustainable agriculture: Increased food, biofuels, and ecosystem security. Renew Sustain Energy Rev 2015;47:117–32. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.02.048.
- [8] Józsa V. Mixture temperature-controlled combustion: A revolutionary concept for ultra-low NOX emission. Fuel 2021;291. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120200.
- [9] Csemány D, DarAli O, Rizvi SAH, Józsa V. Density, kinematic viscosity, surface tension, distillation curve, and flash point data of diesel-biodiesel blends 2021. https://doi.org/10.5281/ZENODO.6367766.
- [10] Rácz E, Malý M, Jedelský J, Józsa V. Gas-phase velocity estimation in practical sprays by Phase-Doppler technique. International Journal of Multiphase Flow 2022;157:104260. https://doi.org/10.1016/J.IJMULTIPHASEFLOW.2022.104260.
- [11] Csemány D, Józsa V. Uncertainty of droplet evaporation measurements and its effect on model validation. n.d.
- [12] Józsa V, Hidegh GT, Csemány D, Kardos RA, Chong CT. Dynamics and emission of nearly flameless combustion of waste cooking oil biodiesel in an ultra-low emission non-MILD swirl burner. Fuel 2022;319:123743. https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2022.123743.
- [13] Kardos RA. Folyékony tüzelőanyagok párolgásának vizsgálata Fázis Doppler Anemométer segítségével. TDK. Budapest University of Technology and Economics, 2021.
- [14] Gerse Károly. Olajégők. Tüzeléstechnika, n.d.
- [15] Urbán A, Groniewsky A, Malý M, Józsa V, Jedelský J. Application of big data analysis technique on high-velocity airblast atomization: Searching for optimum probability density function. Fuel 2020;273:117792. https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2020.117792.

- [16] Urbán A, Malý M, Józsa V, Jedelský J. Effect of liquid preheating on high-velocity airblast atomization: From water to crude rapeseed oil. Exp Therm Fluid Sci 2019;102:137–51. https://doi.org/10.1016/J.EXPTHERMFLUSCI.2018.11.006.
- [17] Urbán A, Zaremba M, Malý M, Józsa V, Jedelský J. Droplet dynamics and size characterization of high-velocity airblast atomization. International Journal of Multiphase Flow 2017;95:1–11. https://doi.org/10.1016/J.IJMULTIPHASEFLOW.2017.02.001.
- [18] Wu H, Zhang F, Zhang Z, Hou L. Atomization and droplet dynamics of a gas-liquid two-phase jet under different mass loading ratios. International Journal of Multiphase Flow 2022;151:104043. https://doi.org/10.1016/J.IJMULTIPHASEF-LOW.2022.104043.
- [19] Wu H, Zhang F, Zhang Z. Fundamental spray characteristics of air-assisted injection system using aviation kerosene. Fuel 2021;286:119420. https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2020.119420.
- [20] Zaremba M, Weiß L, Malý M, Wensing M, Jedelský J, Jícha M. Low-pressure twinfluid atomization: Effect of mixing process on spray formation. International Journal of Multiphase Flow 2017;89:277–89. https://doi.org/10.1016/J.IJMULTIPHASEF-LOW.2016.10.015.
- [21] Lowe A, Kourmatzis A, Masri AR. Turbulent spray flames of intermediate density: Stability and near-field structure. Combust Flame 2017;176:511–20. https://doi.org/10.1016/J.COMBUSTFLAME.2016.10.024.
- [22] Kourmatzis A, Pham PX, Masri AR. Air assisted atomization and spray density characterization of ethanol and a range of biodiesels. Fuel 2013;108:758–70. https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2013.01.069.
- [23] Chong CT, Hochgreb S. Spray flame structure of rapeseed biodiesel and Jet-A1 fuel. Fuel 2014;115:551–8. https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2013.07.059.
- [24] Chong CT, Hochgreb S. Fundamental Spray Combustion Characteristics of Rapeseed Biodiesel, Diesel and Blend. Energy Procedia 2015;75:2394–9. https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2015.07.186.
- [25] Chong CT, Hochgreb S. Flame structure, spectroscopy and emissions quantification of rapeseed biodiesel under model gas turbine conditions. Appl Energy 2017;185:1383– 92. https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2016.01.003.
- [26] Chong CT, Hochgreb S. Effect of atomizing air flow on spray atomization of an internal-mix twin-fluid atomizer. Atomization and Sprays 2015;25:657–73. https://doi.org/10.1615/AtomizSpr.2015011361.
- [27] Chong CT, Hochgreb S. Spray and combustion characteristics of biodiesel: Nonreacting and reacting. Int Biodeterior Biodegradation 2015;102:353–60. https://doi.org/10.1016/J.IBIOD.2015.01.012.
- [28] Hadef R, Lenze B. Measurements of droplets characteristics in a swirl-stabilized spray flame. Exp Therm Fluid Sci 2005;30:117–30. https://doi.org/10.1016/J.EXPTHERM-FLUSCI.2005.05.002.
- [29] Lee SW, No HC. Droplet size prediction model based on the upper limit log-normal distribution function in venturi scrubber. Nuclear Engineering and Technology 2019;51:1261–71. https://doi.org/10.1016/J.NET.2019.03.014.
- [30] Li J, Zhang H, Liu Q. Characteristics of secondary droplets produced by a single drop impacting on a static liquid film. International Journal of Multiphase Flow 2019;119:42–55. https://doi.org/10.1016/J.IJMULTIPHASEFLOW.2019.06.015.

- [31] Lacour SOL, Raoult F, Tinet C, Fournaison L, Delahaye A, Trinquet F. A modal analysis of the size distribution for an hollow-cone spray in cross-flow. Exp Therm Fluid Sci 2019;104:164–74. https://doi.org/10.1016/J.EXPTHERMFLUSCI.2019.02.020.
- [32] Feng Z, Tang C, Yin Y, Zhang P, Huang Z. Time-resolved droplet size and velocity distributions in a dilute region of a high-pressure pulsed diesel spray. Int J Heat Mass Transf 2019;133:745–55. https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASS-TRANSFER.2018.12.147.
- [33] Gamma distribution Wikipedia n.d. https://en.wikipedia.org/wiki/Gamma\_distribution (Utolsó elérés 2022.11.06.).
- [34] Gushchin VA, Matyushin R v. Vortex formation mechanisms in the wake behind a sphere for 200 < Re < 380. Fluid Dynamics 2006;41:795–809. https://doi.org/10.1007/s10697-006-0096-x.
- [35] Lasheras JC, Villermaux E, Hopfinger EJ. Break-up and atomization of a round water jet by a high-speed annular air jet. J Fluid Mech 1998;357:351–79. https://doi.org/10.1017/S0022112097008070.
- [36] Lane WR. Shatter of drops in streams of air. Ind Eng Chem 1951;43:1312–7.
- [37] Hinze JO. Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion processes. AIChE Journal 1955;1:289–95. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/aic.690010303.
- [38] Lefebvre AH, Mcdonell VG. Atomization and Sprays. Második kiadás. Boca Raton: CRC Press; 2017. https://doi.org/10.1201/9781315120911.
- [39] Birch DM, Morrison JF. Similarity of the streamwise velocity component in very-rough-wall channel flow. J Fluid Mech 2011;668:174–201. https://doi.org/10.1017/S0022112010004647.
- [40] Lasheras JC, Hopfinger EJ. Liquid Jet Instability and Atomization in a Coaxial Gas Stream. Annu Rev Fluid Mech 2000;32:275–308. https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.32.1.275.
- [41] Sazhin S. Droplets and Sprays. Springer London Heidelberg New York Dordrecht; 2014. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6386-2.
- [42] Sirignano WA. Fluid dynamics and transport of droplets and sprays. Cambridge: Cambridge University Press; 1999. https://doi.org/doi:10.1017/CBO9780511529566.
- [43] Landis RB, & MAF. Effect of internal diffusional resistance on the evaporation of binary droplets. Proceedings of the Fifth International Heat Transfer Conference, Tokyo, Japan,: 1974.
- [44] Sazhin SS, Elwardany A, Krutitskii PA, Castanet G, Lemoine F, Sazhina EM, et al. A simplified model for bi-component droplet heating and evaporation. Int J Heat Mass Transf 2010;53:4495–505. https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASS-TRANSFER.2010.06.044.
- [45] Sazhin SS, Elwardany AE, Sazhina EM, Heikal MR. A quasi-discrete model for heating and evaporation of complex multicomponent hydrocarbon fuel droplets. Int J Heat Mass Transf 2011;54:4325–32. https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASS-TRANSFER.2011.05.012.
- [46] Sazhin SS. Modelling of fuel droplet heating and evaporation: Recent results and unsolved problems. Fuel 2017;196:69–101. https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2017.01.048.

- [47] Vámos J, Csemány D. Helyettesítő tüzelőanyag összetételének optimalizációja égőtéri szimulációs vizsgálatokhoz. Budapest University of Technology and Economics, 2020.
- [48] Ansys Fluent Theory Guide. 2020 R1. Canonsburg: ANSYS, Inc.; 2020.
- [49] Csemány D, Gujás I, Chong CT, Józsa V. Evaluation of material property estimating methods for n-alkanes, 1-alcohols, and methyl esters for droplet evaporation calculations. Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung 2021;57:1965–79. https://doi.org/10.1007/S00231-021-03059-0/TABLES/4.
- [50] Poling BE, Prausnitz JM, O'Connell JP. The properties of gases and liquids. Ötödik kiadás. McGraw-Hill Companies, Inc.; 2000.
- [51] NIST WebBook n.d. https://webbook.nist.gov/ (Utolsó elérés 2021.11.04.).