

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Ivan Duilo**

Zagreb, godina 2011.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Neven Duić, dipl. ing.

Student:

Ivan Duilo

Zagreb, godina 2011.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se profesoru Nevenu Duiću i znanstvenim novacima Milanu Vujanoviću, Marku Banu i Luki Perkoviću na pruženoj podršci tijekom pisanja ovog rada.

Ivan Duilo



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
 Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
 procesno-energetski, konstrukcijski, brodogradnja i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Ivan Duilo** Mat. br.: 0035159679

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza nastajanja tekućine filma na stjenci pri niskotlačnom ubrizgavanju fluida u obliku spreja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of wall film formation in low pressure injection of liquid spray**

Opis za datka:

U svrhu smanjenja štetnih emisija iz transportnog sektora razvijaju se nove metode kontroliranja izgaranja mješavina goriva i zraka u motorima s unutarnjim izgaranjem. Da bi se postigli idealni uvjeti mješavine potrebno je gorivo ubrizgati na način da kapljice tekućeg goriva što brže ispare i formiraju mješavinu za izgaranje. Kako se gorivo najčešće ubrizgava u obliku spreja potrebno je spriječiti vlaženje stjenke da bi se spriječilo usporavanje procesa isparavanja. Ovim zadatkom je potrebno simulirati ubrizgavanje goriva u geometriji koja se može naći kod motora s unutarnjim izgaranjem. Dobivene simulacijske rezultate je potrebno usporediti s postojećim eksperimentalnim rezultatima kako bi se provjerila ispravnost simulacijskih rezultata.

Simulacija spreja goriva u usisnu cijev motora s unutarnjim izgaranjem će se provesti na način da domena te simulacije bude prezentirana sa cijevi promjera 36 mm i duljine 200 mm na kojoj će biti postavljena mlaznica 30 mm od kraja cijevi. Računalna simulacija će se provesti korištenjem programskog paketa „CFD Workflow Manager“. Potrebno je provesti analizu rezultata s obzirom na stvaranje tekućeg filma na površini stjenke te usporediti s postojećim eksperimentalnim podacima kako bi se utvrdila ispravnost računalne simulacije.

Također u svrhu simulacije procesa koji se odvijaju kod ispušnih sistema motora s unutarnjim izgaranjem sa selektivnom katalitičkom redukcijom potrebno je simulirati proces ubrizgavanja spreja otopine ureje u ispušni sustav. Kao računalnu domenu koristiti mrežu kvadarskog oblika visine 46 mm. Dobivene rezultate je potrebno usporediti s eksperimentalnim podacima kako bi se utvrdila ispravnost simulacije.

U diplomskom zadatku potrebno je navesti svu korištenu literaturu i eventualnu pomoć pri izradi zadatka.

Zadatak zadan:

28. travnja 2011

Rok predaje rada:

30. lipnja 2011.

Predviđeni datum obrane:

06. – 08. srpnja 2011.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Neven Duić

Prof. dr. sc. Mladen Andrassy

Referada za diplomske i završne ispite

Obrazac D5 – 3A/PD5 – 3A

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	II
POPIS SLIKA .....	IV
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	VIII
1. UVOD.....	1
1.1. Karakteristični procesi ubrizgavanja spreja kod motora s unutrašnjim izgaranjem ....	1
1.2. Računalna analiza procesa ubrizgavanja spreja i njegove interakcije sa stjenkom .....	2
1.3. Analiza rezultata .....	4
2. MATEMATIČKI OPIS MODELA INTERAKCIJE SPREJA I STJENKE .....	6
2.1. Režimi interakcije kapljice spreja i stjenke.....	6
2.2. Osnovni zakoni očuvanja .....	8
2.3. Modeliranje spreja.....	9
2.4. Modeliranje filma tekućine .....	10
2.5. Modeliranje isparavanja i dekompozicije otopine ureje i vode .....	13
2.5.1. Model isparavanja UWS-a pri temperaturama $T < 100^{\circ}\text{C}$ .....	14
2.5.2. Model isparavanja UWS-a pri temperaturi $T = 100^{\circ}\text{C}$ .....	15
2.5.3. Termoliza UWS-a .....	16
3. PRINCIPI NUMERIČKIH SIMULACIJA .....	17
3.1. Osnove numeričkih simulacija.....	17
3.2. Prostorna i vremenska diskretizacija.....	18
3.3. Procedura rješavanja numeričkih simulacija.....	19
4. SIMULACIJA UBRIZGAVANJA TEKUĆINE U OBLIKU SPREJA U NAGNUTU CIJEV KROZ KOJU STRUJI ZRAK .....	21
4.1. Uvod.....	21
4.2. Postavke RMF simulacije .....	22
4.2.1. Osnovni pristup kod upotrebe "Fire" softvera .....	22
4.2.2. Mreža .....	23
4.2.3. Vremenski korak .....	24
4.2.4. Postavljanje graničnih uvjeta .....	24
4.3. Pregled simulacija .....	25
4.4. Usporedba simulacija prema različitim pogonskim uvjetima.....	30
4.5. Provjera valjanosti mreže .....	36
4.6. Usporedba rezultata simulacije sa dostupnim eksperimentalnim rezultatima .....	39
5. SIMULACIJA UBRIZGAVANJA SPREJA OTOPINE UREJE I VODE NA HORIZONTALNU STIJENKU .....	41
5.1. Uvod.....	41
5.2. Postavke numeričke simulacije.....	42
5.2.1. Upotreba pojednostavljenog modela.....	42
5.2.2. Mreža .....	43
5.2.3. Vremenska diskretizacija .....	43

---

5.2.4. Granični uvjeti .....	43
5.3. Pregled simulacija .....	44
5.4. Rezultati simulacija za tri pogonska stanja .....	44
5.5. Usporedba sa dostupnim eksperimentalnim podacima .....	47
ZAKLJUČAK .....	48
PRILOZI.....	50
LITERATURA.....	51

## POPIS SLIKA

Slika 1: Geometrija usisnih i ispušnih kanala cilindra motora s unutrašnjim izgaranjem. ....	2
Slika 2: Računalna simulacija ubrizgavanja spreja u zatvorenu geometriju cilindričnog oblika. .....	3
Slika 3: Režimi sudaranja kapljice i stjenke.....	4
Slika 4: Računalni prikaz rezultata simulacije. ....	5
Slika 5: Mapa režima interakcije kapljice i stjenke.....	7
Slika 6: Grafički opis načina rada DDM metode pri interakciji spreja sa stjenkom. ....	9
Slika 7: Prikaz tekućeg filma stjenci i utjecaja viskoznih sila strujanja na njega. ....	11
Slika 8: Maseni tokovi ureje i vode nakon ubrizgavanja kapljice UWS-a.....	14
Slika 9: 2D prikaz prostorne diskretizacije strukturirane mreže. ....	19
Slika 10: Shema postavki simulacije.....	22
Slika 11: Prikaz mreže.....	23
Slika 12: Simulacija ubrizgavanja spreja u nagnutu cijev.....	26
Slika 13: Dobiveni rezultati debljine filma za korištene različite modele. ....	28
Slika 14: Prikaz prvih rezultata testnih simulacija. ....	29
Slika 15: Mapa debljine filma za pogonski uvjet br. 1.....	31
Slika 16: Mapa debljine filma za pogonski uvjet br.2.....	31
Slika 17: Mapa debljine filma za pogonski uvjet br.3.....	31
Slika 18: Mapa debljine filma za pogonski uvjet br.4.....	32
Slika 19: Mapa debljine filma za pogonski uvjet br. 1.....	32
Slika 20: Mapa debljine filma za pogonski uvjet br. 2.....	33
Slika 21: Mapa debljine filma za pogonski uvjet br. 3.....	33
Slika 22: Mapa debljine filma za pogonski uvjet br. 4.....	33
Slika 23: Mapa debljine filma za pogonski uvjet br. 1.....	34
Slika 24: Mapa debljine filma za pogonski uvjet br. 2.....	34
Slika 25: Mapa debljine filma za pogonski uvjet br. 3.....	34
Slika 26: Mapa debljine filma za pogonski uvjet br. 4.....	34
Slika 27: Mapa debljine filma za pogonski uvjet br. 1.....	35
Slika 28: Mapa debljine filma za pogonski uvjet br. 2.....	35
Slika 29: Mapa debljine filma za pogonski uvjet br. 3.....	35
Slika 30: Mapa debljine filma za pogonski uvjet br. 4.....	36
Slika 31: Prikaz mreže sa 129600 volumena. ....	37
Slika 32: Prikaz izolacija debljine filma nakon 1.75 s.....	37
Slika 33: Prikaz izolacija debljine filma nakon 1.75 s.....	38
Slika 34: Prikaz mreže sa 583200 volumena. ....	38
Slika 35: Mreža sa strukturom tipa cilindar-cilindar.....	39
Slika 36: Prikaz izolacija debljine filma za mrežu sa tipa cilindar-cilindar. ....	39
Slika 37: Eksperimentalni rezultati za pogonski uvjet br. 1.....	40
Slika 38: Shematski prikaz simuliranog SCR reaktora. ....	42
Slika 39: Rezultati numeričke simulacije za pogonski uvjet br. 1. ....	45
Slika 40: Rezultati numeričke simulacije za pogonski uvjet br.2. ....	46
Slika 41: Rezultati numeričke simulacije za pogonski uvjet br.3. ....	46
Slika 42: Eksperimentalni rezultati mjerenja temperatura u SCR katalizatoru.....	47

## POPIS TABLICA

Tabela 1: Tok simulacije.....	18
Tabela 2: Tabela simuliranih pogonskih uvjeta.....	30
Tabela 3: Tabela pogonskih uvjeta.....	45



## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$T^*$		Identifikacijski temperaturni kvocijent režima sudaranja
$T_w$	K	Temperatura stjenke
$T_{sat}$	K	Temperatura zasićenja
$K$		Bez dimenzijski identifikacijski broj režima sudaranja
$\rho_d$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća fluida kapljice
$D_d$	m	Promjer kapljice
$u_d$	m/s	Brzina kapljice
$\sigma_d$	N/m	Površinska napetost kapljice
$\mu_d$	kg/(m*s)	Dinamička viskoznost fluida kapljice
$Ca$		Kapilarni broj
$La$		Laplaceov broj
$\Phi$		Opće promatrana ekstenzivna veličina
$\phi$		Fizikalno svojstvo po jedinici mase
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća fluida
$\gamma_A$		Lokalni difuzijski nosioc
$\gamma_m$		Izvor ili ponor
$U_j$	m/s	Brzina fluida
$U_{bj}$	m/s	Lokalna brzina pomične granice kontrolnog volumena
$m_d$	kg	Masa kapljice
$u_{id}$	m/s	Vektor brzine kapljice
$t$	s	Vrijeme
$F_{idr}$	N	Sila otpora
$F_{ig}$	N	Sila koja uključuje efekte gravitacije i uzgona
$F_{ip}$	N	Sila tlaka
$F_{ib}$	N	Suma ostalih sila kao što su magnetska ili elektrostatska itd.
$x_{id}$	m	Vektor pozicije kapljice
$\delta$	m	Prosječna debljina filma
$u$	m/s	Vektor brzine diferencijalnog elementa filma
$x$	m	Vektor pozicije diferencijalnog elementa filma
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća fluida filma
$A$	m <sup>2</sup>	Površina prekrivena filmom
$S_{mD}$	kg/s	Maseni tok koji ulazi u film
$S_{mV}$	kg/s	Maseni tok koji izlazi iz filma
$Y_u$		Maseni udio ureje
$m_{vap}$	kg/s	Isparena masa

$\rho_{g,ref}$	kg/m <sup>3</sup>	Prosječna gustoća plinovite faze
$\Gamma_{g,ref}$	m <sup>2</sup> /s	Prosječni difuzijski koeficijent plinovite faze
Sh		Sharewoodov broj
B <sub>M</sub>		Spaldingov broj
Y <sub>vap,s</sub>		Ispareni maseni udjel na površini kapljice
Y <sub>vap,g</sub>		Ispareni maseni udjel u plinovitoj fazi
T <sub>d</sub>	K	Temperatura kapljice
m <sub>vap</sub>	kg/s	Ispareni masni tok kapljice
c <sub>p,vap,ref</sub>	J/kgK	Prosječni specifični toplinski koeficijent pare na konstantom tlaku
c <sub>p,d</sub>	J/kgK	Specifični toplinski koeficijent kapljice
T <sub>g</sub>	K	Temperatura plinova
h <sub>vap</sub>	J/kg	Specifična entalpija pare
T <sub>s</sub>	K	Temperatura zasićenja
λ <sub>g,ref</sub>	W/mK	Prosječni koeficijent toplinske vodljivosti plinova
Nu		Nuseltov broj
m <sub>u</sub>	kg	Masa ureje
A	s <sup>-1</sup>	Frekvencijski faktor
E <sub>a</sub>	J/mol	Energija aktivacije
R	J/Kmol	Univerzalna plinska konstanta
q <sub>d</sub>	W	Toplinski tok prema kapljici
Nu*		Modificirani Nuseltov broj
h <sub>th</sub>	J/kg	Specifična entalpija hidrolize

## SAŽETAK

Ovim radom će se pomoću računalnog softvera izvršiti analiza ubrizgavanja fluida u obliku spreja u zadanu geometriju. Na taj način će se simulirati uvjeti rada sličnih sustava koje nalazimo u sustavima motora s unutrašnjim izgaranjem.

Prvi primjer simulacije jednog takvog sustava je ubrizgavanje spreja goriva u usisnu cijev motora. Iako već danas u uporabi imamo velik broj motora sa stranim paljenjem ("benzinski motori"-motori koji koriste strani izvor zapaljenja mješavine goriva i zraka, najčešće iskrom iz svjećice) koji imaju direktno ubrizgavanje goriva u cilindar još uvijek kod cestovnog prometa najveći udio motora sa stranim paljenjem koristi sustav koji ubrizgava gorivo u usisnu cijev cilindra te se mješavina za izgaranje formira prije ulaska u cilindar. Kod takvih sustava zbog ograničene geometrije često dolazi do sudara spreja sa stjenkom cijevi. U takvim uvjetima zbog te kolizije često dolazi do efekta vlaženja stjenke što na kraju rezultira stvaranjem potoka tekućeg filma goriva koji onda lagano teče prema glavi ventila i prilikom njegova otvaranja nekontrolirano ulazi u cilindar. Simulacijom takvog sustava pomoću geometrije cijevi i postavljene brizgalice analizirat će se pojava takvog tekućeg filma na stjenci te njegova debljina. Korištenjem računalnih alata za numeričko simuliranje interakcije fluida u određenoj geometriji ulazimo u granu mehanike fluida koja se zove Računalna mehanika fluida (RMF). Principi RMF-a i njegove pretpostavke će biti korišteni za ovu simulaciju i analizu dobivenih saznanja putem simulacije. Također da bi se potvrdila ispravnost simulacije napraviti će se usporedba simulacije s dostupnim eksperimentalnim podacima te procjena odstupanja.

Drugi primjer koji se može simulirati je ubrizgavanje otopine ureje i vode i interakcija njenog spreja sa stjenkom geometrije u koju se ubrizgava. Tu se također analizira interakcije spreja sa stjenkom i procesi koji se odvijaju. Kod ovog primjera zanimljiva točka gledišta je isparavanje ubrizgane tekućine na stjenci te efekt hlađenja stjenke koji se pri tome pojavljuje. Iz tog razloga glavna promatrana veličina kod ove analize će biti temperatura stjenke. Ovaj proces se pojavljuje u skoro svakom uređaju za selektivnu katalitičku redukciju. Ta tehnologija je vrlo često upotrebljavana u ispušnim sustavima motora u svrhu smanjivanja štetnih emisija.

U prvom poglavlju dane su osnovne informacije bitne za ovaj rad. Sljedeće poglavlje opisuje matematičke modele koji su korišteni za opisivanje procesa bitnih za analizu ubrizgavanja spreja u određenu geometriju. Nakon toga su opisani osnovni principi računalne mehanike fluida. Sljedeća poglavlja sadrže opise analize računalnih simulacija za dostupne modele interakcije spreja/stjenka koji su dani u računalnom softveru "Fire". Nakon analize dobivenih simulacijskih rezultata dana je usporedba s dostupnim eksperimentalnim podacima. Zadnje poglavlje donosi zaključak o ovom radu i napomene za moguća daljnja istraživanja.

## SUMMARY

Computer analysis of fluid spray injection in given geometry will be carried out in this work. On this principle working conditions in systems similar to the internal combustion engine systems will be simulated.

First case of characteristic system for simulation is injection of liquid fuel in intake system of internal combustion engine. Even today we have a high number of spark ignited internal combustion engines which use direct injection of fuel spray in combustion chamber, there is still a significant number of vehicles in transport system which use engines with intake system fuel injection. In this case a mixture for combustion is formed in intake system. In this type of intake design often there is collision of spray and intake pipe wall due to limited space for injection. Due to this collision of spray and wall there is a number of work conditions which will result with wall film formation on the wall of intake pipe. This wall film, if this work conditions start to appear frequently, will form a liquid stream which is flowing in direction of valve seat and starts to enter combustion area uncontrolled. Analysis of this wall film phenomenon and its thickness will be performed by simulating similar case with pipe geometry and adjusted injector. By using computer software tools for numerical simulation of fluid interaction in given volume we are stepping in section of fluid dynamics which is called computational fluid dynamics (CFD). Principles of CFD and its assumptions will be used for simulating this case and analysis of the results gathered by simulation. After everything, to confirm accuracy of these simulations there will be a comparison with experimental results carried out.

Second case which can be simulated is injection of urea water solution and interaction of its spray with wall of exhaust system. In this case we also analyze spray wall interaction and processes which appear due to this interaction. In this example a point of interest is evaporation of injected liquid on wall and cooling effect which is a result of this evaporation. For that reason main point of analysis will be temperature of the wall. This process takes place in almost every device for selective catalytic reduction. This technology is often used in exhaust systems of internal combustion engines in purpose of emissions reduction

In first chapter general information important for this work are given. Next chapter describes mathematical models which were used for modeling processes relevant for analysis of fluid

injection in given geometry. After that, basic principles of CFD are described. Next chapters contain simulations of available „Fires“ spray/ wall interaction models and their analysis. After this analysis, comparisons with experimental results have been made. Last chapter contains conclusion and notice for possible afterward research.

## 1. UVOD

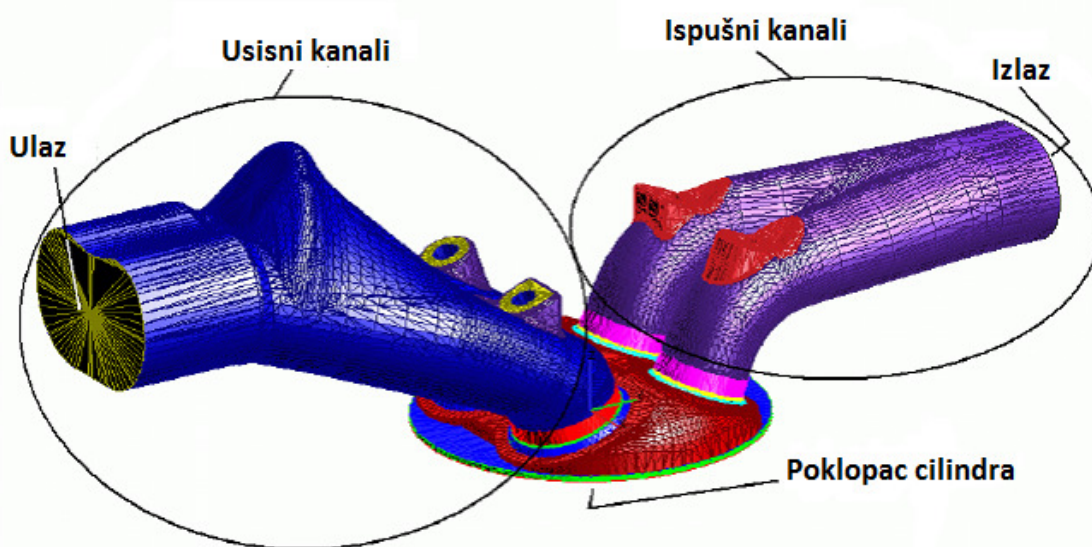
Kako bi se detaljnije proučili svi utjecaji na te fizikalne procese koji se odvijaju kod promatranog objekta radi uštede vremena i novca eksperimentalne metode zamjenjuju računalne simulacije. Korištenjem računalnih softvera za simuliranje strujanja i interakcije fluida može se dobiti jako dobar uvid u fizikalne procese koji se odvijaju u zadanom kontrolnom volumenu određene geometrije. Na taj način je moguće brže i efikasnije doći do optimalnog inženjerskog rješenja kod rješavanja različitih problema. Zbog toga su razvijeni specijalizirani softveri koji se koriste u različitim područjima inženjerske prakse. "Fire" je softver koji je specijaliziran za modeliranje procesa koji se odvijaju u različitim dijelovima sustava motora s unutrašnjim izgaranjem. Jedna od mogućnosti ovog softvera je mogućnost simulacije ulaska čestica fluida u kontrolni volumen i njihov razvoj. Na taj način se simulira ubrizgavanje spreja u određenu geometriju te njegova interakcija sa stjenkom te geometrije.

### 1.1. Karakteristični procesi ubrizgavanja spreja kod motora s unutrašnjim izgaranjem

U svakom motoru s unutarnjim izgaranjem možemo naći nekakav oblik interakcije spreja i stjenke. U motoru sa stranim paljenjem sprej goriva udara u stjenku usisne cijevi ili u stjenku glave klipa. U motoru s kompresijskim paljenjem sprej goriva udara u stjenku klipa ili komore za predpaljenje. Interakcija spreja i stjenke može se naći na još nekim mjestima u sustavima motora s unutrašnjim izgaranjem. Jedan od primjera je ubrizgavanje otopine vode i ureje (*eng. Urea water solution*) u ispušnoj cijevi da bi se reducirale  $\text{NO}_x$  emisije. Fluid koji se ubrizgava je u ukapljenom stanju. Ukoliko uvjeti odgovaraju može doći do toga da interakcija spreja i stjenke rezultira stvaranjem filma tekućine na stjenci. Nastajanje tekućeg filma na stjenci je u svim slučajevima nepoželjno i može stvoriti velike probleme.

Za rad motora s unutrašnjim izgaranjem potrebno je stvoriti mješavinu za izgaranje te je dovesti u komoru izgaranja (cilindar) gdje se ona zapali i na taj način obavi proces ekspanzije [1]. Da bi se ostvarili pogodni omjeri mješavine zraka i goriva gorivo se ubrizgava u obliku spreja u usisnu cijev ili direktno u cilindar kod motora sa stranim paljenjem ili u komoru za predpaljenje ili cilindar kod motora s kompresijskim paljenjem. Svrha ubrizgavanja goriva u obliku spreja je u tome da gorivo što brže ispari i tako u plinovitom obliku s dovedenim

zrakom stvori pogodnu mješavinu za proces izgaranja. Ukoliko u takvim sustavima dođe do vlaženja stjenke proces isparavanja goriva će se usporiti. To će prouzrokovati ulazak neodgovarajuće mješavine u cilindar te s tim i pada snage motora. U sljedećim ciklusima otvaranja ventila za usis može doći do ulijevanja potoka tekućeg filma na stjenci u cilindar što će opet poremetiti parametre za izgaranje u cilindru. Tako nastajanje filma tekućine na stjenci usisne cijevi ili glave cilindra na kraju će rezultirati većom potrošnjom, povećanjem emisija ne izgorjenih ugljikovodika i imat će značajan utjecaj na povećanje emisija zagađivača kao što su  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_2$  i krutih čestica.



**Slika 1: Geometrija usisnih i ispušnih kanala cilindra motora s unutrašnjim izgaranjem.**

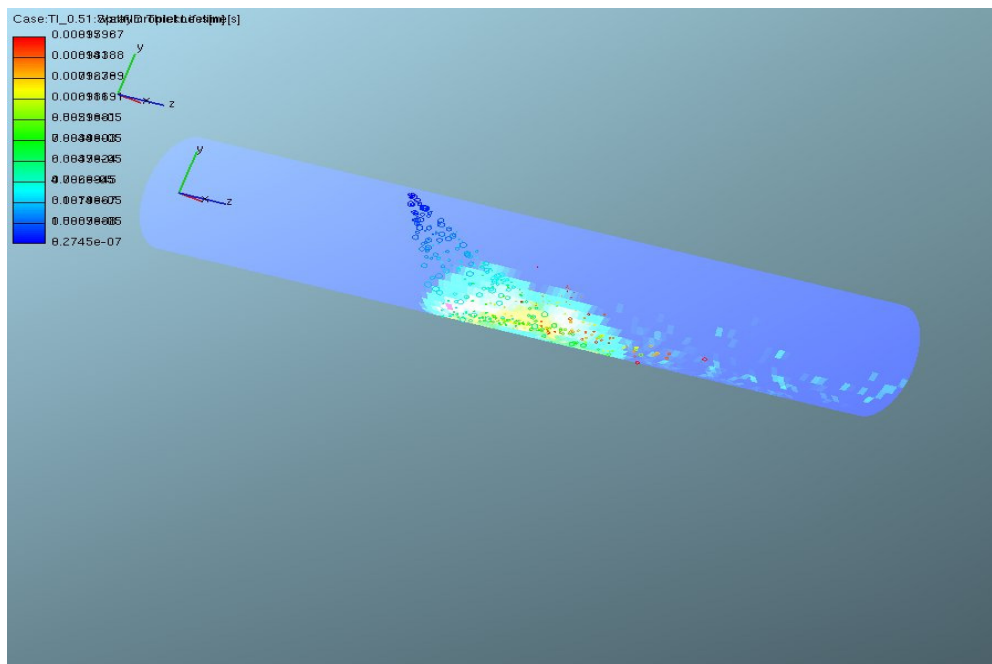
Da bi smanjili nastanak filma tekućine prvo moramo proučiti uvjete koji pogoduju njegovom nastajanju. Ovo je jako teško i zahtjeva jako mnogo vremena da bi se eksperimentiralo s različitim uvjetima na različitim oblicima. Protok zraka kroz usisnu cijev i količina ubrizganog goriva variraju u ovisnosti o opterećenju motora. Bilo bi jako skupo i vremenski jako dugo pripremiti i načiniti toliko velik broj eksperimenata. Alternativa svim tim eksperimentima je Računalna mehanika fluida (RMF) pomoću koje će se provesti numeričke simulacije [2][3][4][5] takvih procesa.

## **1.2. Računalna analiza procesa ubrizgavanja spreja i njegove interakcije sa stjenkom**

Analizu procesa ubrizgavanja spreja i njegove interakcije sa stjenkom ćemo vršiti pomoću računalnog softvera "Fire" koji se temelji na principima RMF-a. Računalna mehanika fluida je dio mehanike fluida koji koristi numeričke metode i algoritme za rješavanje jednadžbi



strujanja fluida kroz zadanu geometriju. AVL-ov "Fire" je rješavač koji rješava numeričke jednadžbe zakona očuvanja zadane od korisnika za definirano strujanje fluida. Upotrebom alata za obradu rezultata dobivenih računalnim rješavanjem ovih jednadžbi analiziramo strujanje fluida. Upotrebom takvih računalnih softvera možemo simulirati uvjete različitih fizikalnih veličina, kao tlak, temperaturu, itd., i pomoću numeričkih simulacija dolaziti do zaključaka o ponašanju fluida. Jedan od procesa koji može biti simuliran i analiziran pomoću RMF softvera je ubrizgavanje kapljevine i nastajanje tekućine filma na stjenci.

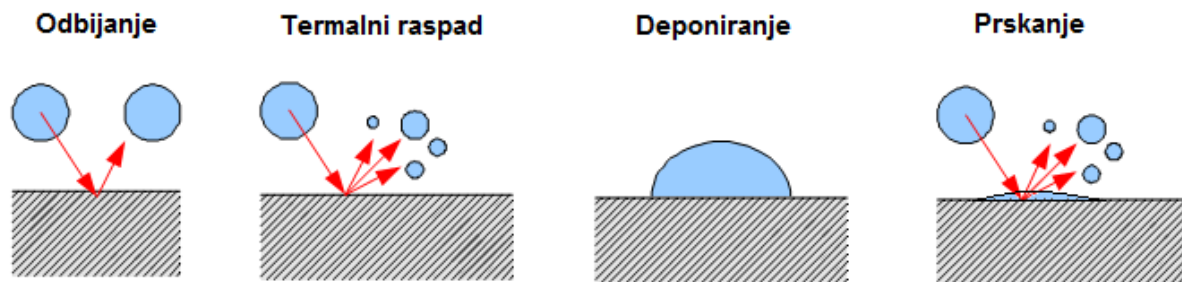


**Slika 2: Računalna simulacija ubrizgavanja spreja u zatvorenu geometriju cilindričnog oblika.**

Postoje različiti matematički pristupi na kojima se baziraju metode proračuna kod RMF-a. „Fire“ je baziran na metodi kontrolnih volumena. Metoda kontrolnih volumena u RMF-u leži na principima osnovnih jednadžba očuvanja za veličine koje opisuju ponašanje materije kad je ona u interakciji sa svojom okolinom. To znači da je domena simulacije sastavljena od konačnog broja volumena. Svaki od ovih volumena se ponaša kao zasebni kontrolni volumen za koji će biti sastavljen set numeričkih jednadžbi kako bi se došlo do rješenja ekstenzivnih veličina karakteristika fluida za taj volumen. Za svaki ovaj pojedini kontrolni volumen osnovne jednadžbe očuvanja su rješavane u danom vremenskom koraku.

Kod računalne analize procesa ubrizgavanja spreja i njegove interakcije sa stjenkom najbitnija je metoda koja će biti upotrjebljena za matematički opis kontakta kapljice sa stjenkom. Postoje četiri mogućnosti interakcije kapljice i stjenke koje se mogu odvijati pri njihovom sudaranju [6]. To su odbijanje, termalni raspad, deponiranje i prskanje. Svaki od ovih režima

sudara kapljice i stjenke se događa pri definiranim fizikalnim uvjetima i značajno utječe na formaciju tekućine filma na stjenci.

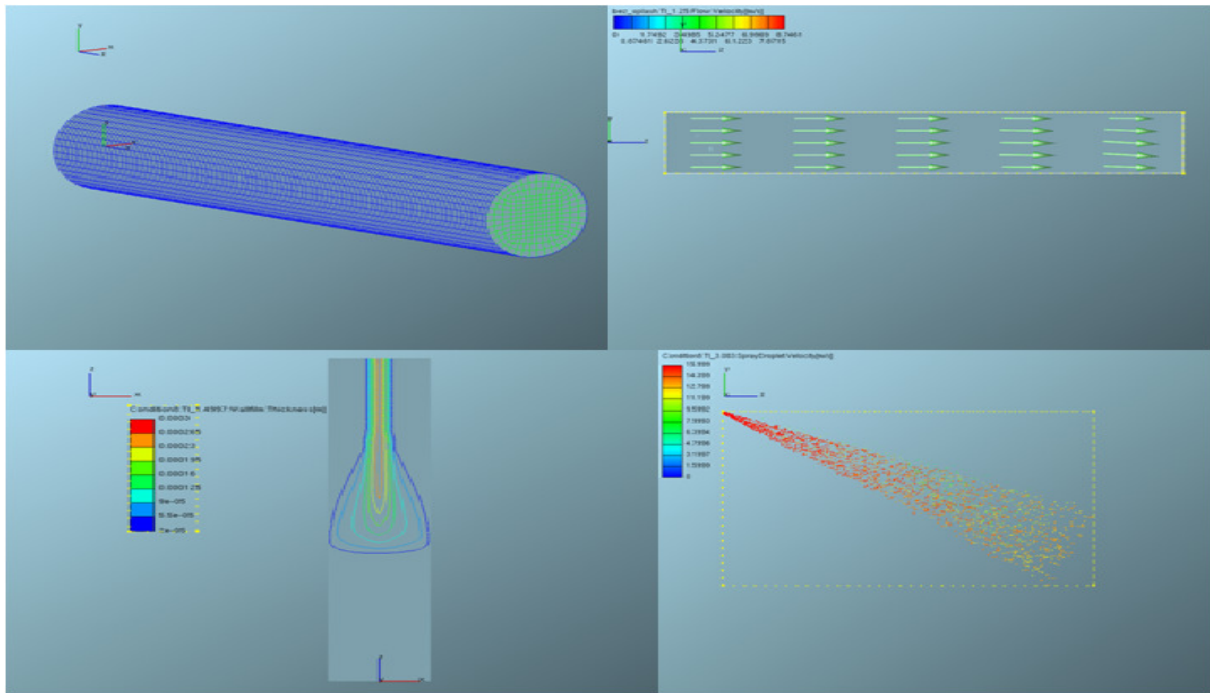


Slika 3: Režimi sudaranja kapljice i stjenke.

### 1.3. Analiza rezultata

Numeričke simulacije putem softvera za analizu rezultata omogućuju odličan uvid u rezultate dobivene računalnom simulacijom. Putem alata za obradu rezultata možemo dobiti grafički prikaz tekućine filma na stjenci. Njihovim korištenjem kreiramo različite grafove iz kojih se na jednostavniji način mogu izvući zaključci dobiveni rezultatima simulacije.

Prikaz debljine tekućeg filma na stjenci ćemo tako prikazati pomoću izolinija koje će spajati točke iste debljine filma mjerene od stjenke u smjeru osi z. Različite boje izolinija će prikazivati različite debljine filma na stjenci od najdebljih slojeva koje će označavati tamnocrvena boja do najtanjih slojeva koje će označavati tamnoplava boja. Također s tim prikazima možemo vidjeti i rasprostranjenost filma po površini stjenke cijevi.



**Slika 4: Računalni prikaz rezultata simulacije.**

Na drugom obliku geometrije kod kojeg nam je glavni predmet promatranja promjena temperature na stjenci, kao posljedica isparavanja kapljica na stjenci, analizu rezultata ćemo vršiti na način da će se odabrati četiri točke na geometriji u pravilnom rasponu u području gdje sprej kapljica udara u stjenku. Iz te četiri točke će se za svaki vremenski trenutak izračunati temperatura. Rezultati simulacije promjene temperature će biti dani putem grafova ovisnosti temperature u vremenu.

## 2. MATEMATIČKI OPIS MODELA INTERAKCIJE SPREJA I STJENKE

### 2.1. Režimi interakcije kapljice spreja i stjenke

Fluid koji se ubrizga iz sapnice pod tlakom u vanjski prostor zbog djelovanja različitih sila se raspršuje i formira kapljice. Ponašanje kapljice kad dođe do stjenke ovisi o nekoliko parametara kao što su brzina kapljice, promjer, karakteristike kapljice, površinska hrapavost stjenke i temperatura stjenke. Kod motora s unutrašnjim izgaranjem zbog nezavršenog isparavanja i raspršivanja veliki dio kapljica ubrizganog goriva udara u stjenke usisne cijevi ili ventila. Kod motora s kompresijskim paljenjem (dizelskih motora) ovi udari u stjenku se dešavaju u komori za izgaranje. U ovisnosti o lokalnim fizikalnim uvjetima i količini gibanja kapljice možemo identificirati različite oblike režima sudaranja. Četiri režima sudaranja kapljice i stjenke mogu biti identificirana [6]. To su odbijanje, termalni raspad, deponiranje i prskanje.

Odbijanje: Kod malih brzina kapljice i suhe i vruće površine stjenke, parni jastuci sprječavaju kontakt između kapljice i stjenke. U takvom slučaju će se kapljica odbiti od parnog jastuka (koji se još naziva Leidenfrostovim fenomenom) na stjenci bez da se raspukne. U slučaju nesavršenog odbijanja kapljica se može i raspasti na nekoliko manjih kapljica.

Termalni raspad: Ovo je raspršivanje kapljice na vrućoj površini stjenke. Veća temperatura će rezultirati finijim raspadom kapljica.

Deponiranje: Kapljice dolaze do stjenke s malom kinetičkom energijom (malom brzinom udaranja). U ovom slučaju će se kapljica spojiti s postojećom tekućinom filma. Ovaj efekt rezultira povećanjem tekućine filma na stjenci.

Prskanje: Ovo je raspršivanje na hladnoj (suhoj ili vlažnoj) površini zbog velike kinetičke energije (velika udarna brzina kapljice). Povećanje tekućine filma se događa kod nastupanja prskanja. Međutim, prskanje suprotno od deponiranja rezultira nastajanjem novih malih kapljica iz postojećeg filma tekućine.

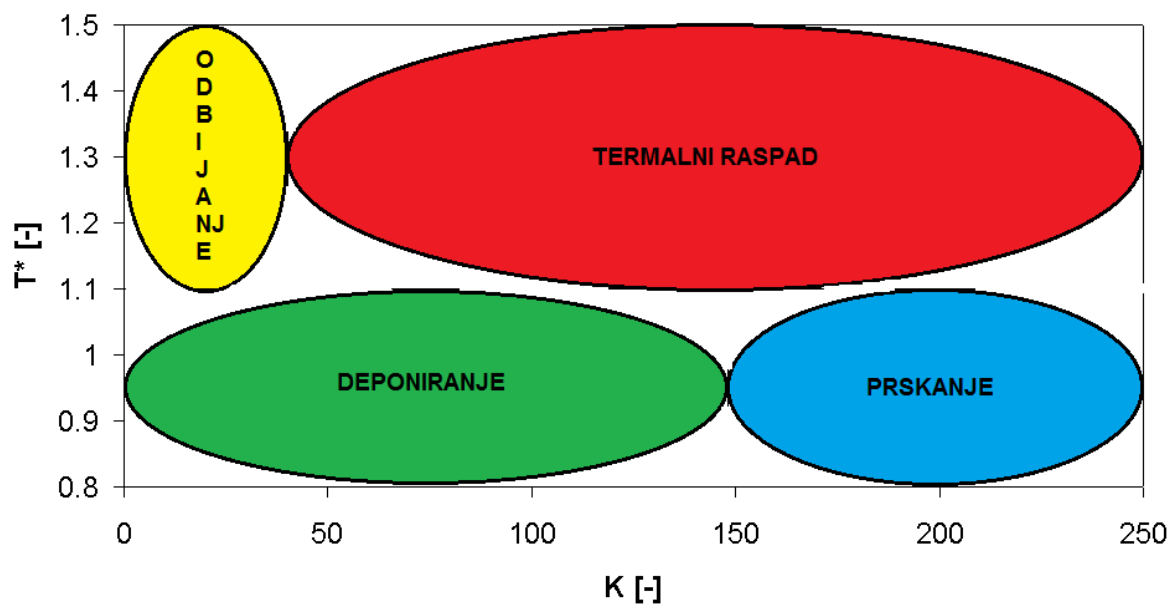
Ovakva klasifikacija režima sudaranja se može identificirati prema fizikalnim karakteristikama fluida i stjenke na temelji dva bez dimenzijska broja  $T^*$  i  $K$ .  $T^*$  je kvocijent stvarne temperature stjenke i temperature zasićenja fluida kapljice.

$$T^* = \frac{T_w}{T_{sat}} \quad (1)$$

Broj K predstavlja bez dimenzijski identifikacijski broj režima sudaranja i ovisan je o fizikalnim karakteristikama kapljevine fluida i brzine kapljice. Također broj K možemo prikazati kao umnožak potencija druga dva bez dimenzijska broja, kapilarnog broja i Laplaceovog broja.

$$K = \frac{\rho_d^{3/4} \cdot D_d^{3/4} \cdot u_d^{5/4}}{\sigma_d^{1/2} \cdot \mu_d^{1/4}} = La^{3/4} \cdot Ca^{5/4} \quad (2)$$

Na temelju ta dva bez dimenzijska broja mogu se definirati vrijednosti u kojima će se pojedini režim interakcije odvijati. Sljedeći graf prikazuje s kojim se vrijednostima može pojaviti pojedini režim interakcije kapljice i stjenke.



**Slika 5: Mapa režima interakcije kapljice i stjenke.**

Pojava tekućine filma će jako ovisiti o režimu interakcija kapljica i stjenke te će se u pogodnom režimu kao što je deponiranje tekući film puno brže stvarati. Ovakav model interakcije spreja kapljica i stjenke je integriran u računalni softver "Fire" [7]. Pravilnim postavljanjem značajki simulacije fizikalnih procesa će se doći do konačnog rješenja, a to bi

kod ovog rada bila debljina tekućine filma na stjenci. Daljnji tekst donosi objašnjenje osnovnih matematičkih modela koji će biti korišteni za simulaciju.

## 2.2. Osnovni zakoni očuvanja

Osnovni zadatak RMF-a je da riješi numeričke algoritme za osnovne zakone očuvanja dinamike fluida i termodinamike. Ovi zakoni su:

Očuvanje mase → Jednadžba kontinuiteta

Očuvanje količine gibanja → Jednadžba količine gibanja

Očuvanje momenta količine gibanja → Jednadžba momenta količine gibanja

Očuvanje energije → Energijska jednadžba

Fundamentalni fizikalni zakoni očuvanja (mase, količine gibanja, energije, entalpije, itd.) u svojoj osnovnoj formi su definirani za maseni sistem („kontrolna masa“) i mogu biti formulirani u jedinstvenu formu koja predstavlja brzinu promjene ekstenzivnog svojstva

$$\Phi = \int_V \rho \phi dV \quad (3)$$

kao posljedicu interakcije ovog masenog sistema sa svojom okolinom:

$$\left( \frac{d\Phi}{dt} \right)_m = \int_A \gamma_A dA + \int_V \gamma_m \rho dV \quad (4)$$

gdje je  $\Phi$  ekstenzivna veličina koja se promatra (masa, količina gibanja, moment količine gibanja, energija, entalpije, itd.),  $\phi$  je odgovarajuće svojstvo po jedinici mase,  $\rho$  je gustoća fluida,  $\gamma_A$  je lokalni difuzijski nosioc  $\phi$ -ja na kontrolnoj granici po vremenskoj jedinici, i  $\gamma_m$  je izvor ili ponor  $\phi$ -ja po jedinici mase i jedinici vremena.

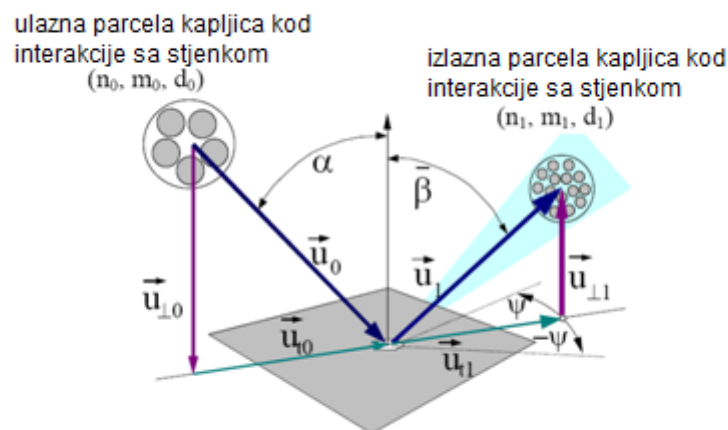
Upotrebom Reynoldsovog transportnog teorema za elementarni kontrolni volumen jednadžba (4) može biti transformirana za kontrolni volumen. Direktna upotreba Reynoldsova teorema dovodi do osnovne (jake konzervativne) forme diferencijalnog zakona očuvanja za intenzivnu veličinu  $\phi$  (u indeksnoj notaciji):

$$\frac{D(\rho\phi)}{Dt} = \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho\phi [U_j - U_{bj}]) \quad (5)$$

gdje je  $U_j$  brzina fluida, a  $U_{bj}$  je lokalna brzina pomične granice kontrolnog volumena.

### 2.3. Modeliranje spreja

Simulacija spreja zahtjeva uvođenje fenomena višefaznog strujanja fluida koji kao takav zahtjeva istovremeno numeričko rješavanje jednadžbi zakona očuvanja za plinovito i tekuće stanje. Što se tiče kapljevite faze praktično svi proračuni spreja u inženjerskoj okolini su danas bazirani na statističkoj metodi poznatoj kao „Metoda diskretnih kapljica (eng. Discrete droplet model-DDM)“. Kratko objašnjenje metode bi bilo da se za kapljice različitih veličina rješavaju uobičajene diferencijalne jednadžbe za trajektorije, količinu gibanja, maseni i toplinski tok. Kapljice međusobno istih karakteristika se grupiraju skupine koje se zovu „parcele“. Rješenje za jednu kapljicu predstavlja rješenje grupe jednakih međusobno ne interaktivnih kapljica. Tako onda rješenje za jednu kapljicu ove grupe prezentira ponašanje cijele parcele.



**Slika 6: Grafički opis načina rada DDM metode pri interakciji spreja sa stjenkom.**

Parcele kapljica su uvedene u domenu strujanja s početnim uvjetima pozicije, veličine, brzine, temperature i broja kapljica u parceli. Izmjena količine gibanja, turbulentna disperzija, isparavanje kapljice, sekundarno razbijanje, sudaranje kapljica i interakcija kapljice i stjenke su obuhvaćeni opsežnim setom modela. Para kapljice koja isparava je upotrijebljena kao izvor

za dodatnu transportnu jednadžbu udjela pare u Eulerovoj formulaciji pri modeliranju strujanja kroz geometriju. Tu je samo prezentirano osnovno modeliranje spreja pomoću transportne jednadžbe količine gibanja za trajektorije i brzine parcela kapljica.

$$m_d \cdot \frac{du_{id}}{dt} = F_{idr} + F_{ig} + F_{ip} + F_{ib} \quad (6)$$

U ovoj jednadžbi  $m_d$  predstavlja masu kapljice, a  $u_{id}$  vektor brzine. Tako je promjena količine gibanja jednaka sumi svih sila koje djeluju na kapljicu.  $F_{idr}$  je sila otpora,  $F_{ig}$  je sila koja je posljedica efekata gravitacije i uzgona,  $F_{ip}$  je sila tlaka, a  $F_{ib}$  je predstavlja sumu svih ostalih sila koje mogu djelovati na kapljicu kao što su elektrostatska ili magnetska. Usporedbom veličina svih sila koje djeluju na kapljicu sila otpora je jedina relevantna sila za izračunavanje ubrizgavanja i izgaranja spreja.

Vektor pozicije čestice možemo lako dobiti integrirajući jednadžbu:

$$\frac{dx_{id}}{dt} = u_{id} \quad (7)$$

Gdje je  $x_{id}$  vektor pozicije težišta kapljice.

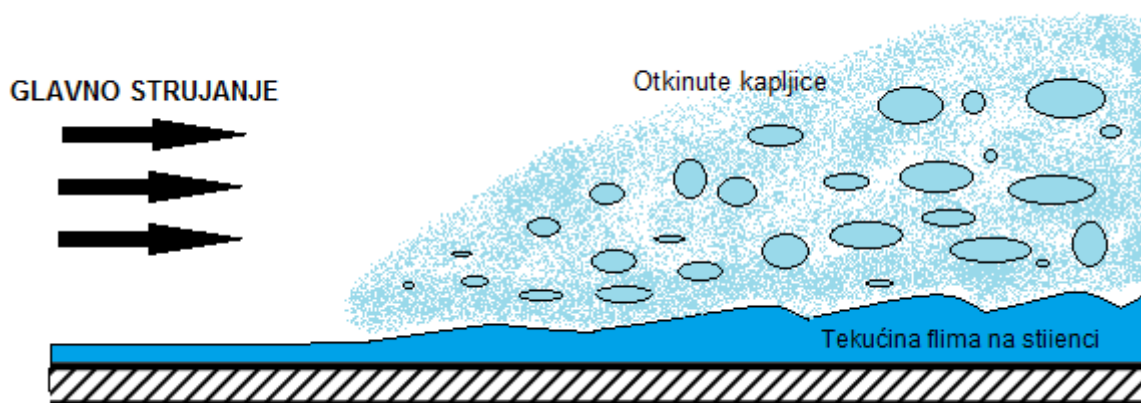
#### 2.4. Modeliranje filma tekućine

U usisnoj cijevi motora sa stranim paljenjem značajna količina goriva se može nakupiti na stjenkama u obliku tankog tekućeg filma kao posljedica ne završenog isparavanja ubrizganih kapljica te sudaranja istih sa stjenkom. U ovisnosti o lokalnim fizikalnim uvjetima tekući film će ili ispariti ili biti odnošen duž stjenke. Dio filma će biti otkinut u obliku odvojenih kapljica i fluid će biti nošen kao kapljice dalje strujanjem. Zbog puno veće viskoznosti tekuće faze, brzina filma je samo 1 do 3 posto normalne brzine strujanja zraka. Ovo vodi do neželjenog nakupljanja tekućeg goriva na stjenke usisa. Film dolazi do usisnog ventila sa zakašnjenjem od nekoliko okretaja bregastog vratila, ovisno o položaju brizgaljke. Na ventilu i sjedištu ventila film se raspada na relativno velike kapljice koje se naknadno premještaju u komoru za izgaranje ili su odnošene natrag u usisnu cijev zbog ranijeg zatvaranja usisnog ventila. S druge strane nakupljeni film, kojeg može biti do nekoliko kubičnih centimetara, isparava pri padu tlaka u usisnoj cijevi uzrokovanog zatvaranjem regulatora. Svi ovi efekti negativno



utječu na formiranje mješavine zraka i goriva, posebno pri uvjetima hladnog starta i pri promjenjivim uvjetima opterećenja motora, ali isto tako i kod kvazistacionarnih uvjeta rada motora.

Ovo sve vodi do smanjenja potencijala performansi motora i povećanja emisija. Prema tome vrlo je važno za inženjera da prilikom konstrukcije zna količinu i lokaciju na kojoj će nastati film tekućine kao i njegovu dinamiku. Eksperimentiranje je u ovim slučajevima jako skupo i vremenski jako dugo. Ponekad je i nemoguće zbog utjecaja mjerne opreme na sam eksperiment. Rješenje za ovaj problem može biti u numeričkim simulacijama.



**Slika 7: Prikaz tekućeg filma stjenici i utjecaja viskoznih sila strujanja na njega.**

Modeliranje takvih kompliciranih procesa zahtjeva određen broj pojednostavljenja i pretpostavki. Ova pojednostavljenja i pretpostavke su:

- Plinovita i tekuća faza su tretirane kao odvojene pojedinačne faze. Prema tome ovo nije kompletan dvofazni model nego prije dva jednofazna modela spojena na površini filma. Spajanje ove dvije faze je postignuto modificiranim setom graničnih uvjeta baziranih na polu empirijskim relacijama.
- Debljina filma je jako mala s obzirom na prosječni promjer strujanja plinovite faze. Pa prema tome nikakva adaptacija volumena mreže prema površini filma nije potrebna.
- Valovita površina filma nije detaljno simulirana već je modelirana osrednjenom debljinom tekućine filma s nad nametnutom hrapavosti filma.
- Pretpostavljeno je da je osrednjena površina filma paralelna s krutom stjenkom.
- Zbog malene debljine filma i male brzine filma granični tenzor naprezanja na površini i trenje na stjenici dominiraju ponašanjem filma s obzirom na inercijske sile i poprečno naprezanje.

- Temperatura stjenke je ispod Leidenfrostove točke.

Zbog svih ovih pojednostavljenja i pretpostavki moramo razumjeti da ovaj model ima svoja ograničenja. Posebno ako debljina filma postane prevelika mogu se pojaviti pogrešni rezultati zbog zanemarivanja inercijskog efekta.

Svi relevantni fizikalni efekti, koji utječu na formaciju filma i strujanje filma su:

- Granična tangencijalna sila (tangencijalna sila na stjenku)
- Gravitacijska akceleracija
- Gradijent tlaka
- Isparavanje filma
- Toplinski tok između filma i stjenke i plinovite faze
- Interakcija sa sprejem koji udara u film
- Otkidanje filma

Osnovna jednadžba strujanja tekućine filma na stjenci je jednadžba debljine filma. To je lagano modificirana formulacija jednadžbe kontinuiteta, koja je transformirana u jednadžbu očuvanja debljine filma. Radi jednostavnosti tu je spomenuta samo Cartesianska formulacija.

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{\partial(\delta \cdot u_1)}{\partial x_1} + \frac{\partial(\delta \cdot u_2)}{\partial x_2} = \frac{1}{\rho \cdot A} (S_{mD} - S_{mV}) \quad (8)$$

Sljedeći uobičajeni korak bi bio upotrijebiti jednadžbe količine gibanja da se nađu komponente brzine  $u_1$  i  $u_2$ . Pretpostavimo da su komponente brzine poznate kao maseni tokovi  $S_m$ . Sad konventivni dijelovi:

$$\frac{\partial(\delta \cdot u_1)}{\partial x_1}, \frac{\partial(\delta \cdot u_2)}{\partial x_2}$$

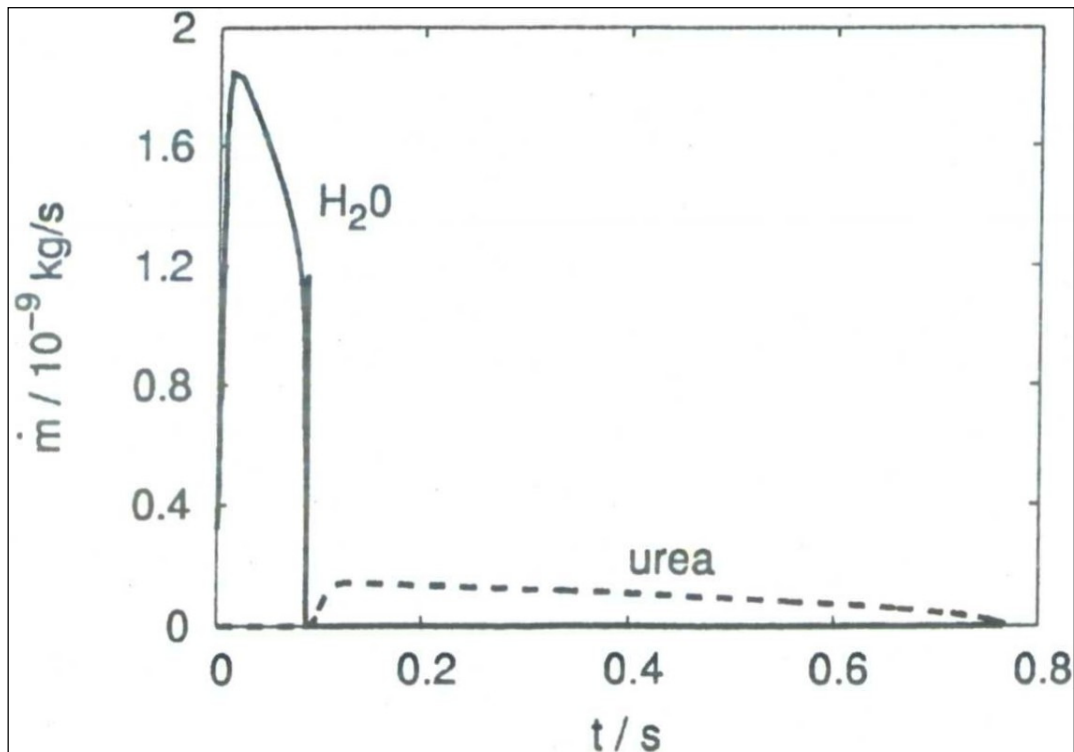
mogu biti procijenjeni i jednadžba (8) može biti riješena odmah eksplicitno. Ovo je bolji, izravniji pristup. Prema tome je primarni interes metoda određivanja komponenta brzina filma. Profili brzina filma u obzir uzimaju samo efekte gravitacije, gradijenta tlaka i smičnih sila u ravnini paralelnoj sa stjenkom. Inercijski efekti su zanemareni, kao i ostale smične sile (obje su neznačajne za tanke filmove). S druge strane, rješavanje cijele jednadžbe količine gibanja je zaobiđeno što jako pojednostavljuje model. Kako su inercijski efekti ignorirani

profili koji su uvedeni ovako su stacionarnog stanja. Dok je god film tanak stacionarno stanje se dostiže u djeliću sekunde što opravdava ovaj pristup. Detaljniji opis ovog pristupa se može naći u priručniku za "Fire CFD workflow manager" [7].

## **2.5. Modeliranje isparavanja i dekompozicije otopine ureje i vode**

Kod drugog primjera simulacije moramo uvesti nove zakonitosti za odvijanje procesa koji se događaju pri ubrizgavanju otopine ureje i vode u ispušne plinove motora s unutrašnjim izgaranjem. Pri tome moramo razmatrati da različite komponente te otopine imaju različite točke isparavanja. Također moramo uračunati i kemijske procese koji se u tim slučajevima odvijaju [8][9][10].

Kad se kapljica UWS-a ubrizga prvo voda ispari iz kapljice jer je tlak zasićenja vode veći u odnosu na tlak zasićenja kapljevite ureje u otopini. Nakon isparavanja vode kapljica mora biti dalje zagrijavana da se ureja rastali i krene dekompozicija (termoliza) ureje. Razlika između masenih tokova za vrijeme isparavanja nastaje zbog kombinacije veće potrebne temperature kapljice i veće reakcijske entalpije za termolizu ureje. Važno je za shvatiti da karakteristike kapljice nisu homogene kroz cijelu kapljicu, npr. dekompozicija može započeti na površini kapljice dok unutarnji dio kapljice još sadrži krutu ureju. Zbog toga što je temperatura zasićenja vode 100 °C matematički model za isparavanje je drugačiji za temperature niže i jednake 100 °C.



Slika 8: Maseni tokovi ureje i vode nakon ubrizgavanja kapljice UWS-a.

### 2.5.1. Model isparavanja UWS-a pri temperaturama $T < 100^\circ\text{C}$

Za vrijeme procesa isparavanja vode iz UWS kapljice koncentracija ureje će se povećavati. Promjena masenog udjela ureje i tako koncentracije u UWS kapljici se računa pomoću jednadžbe:

$$\frac{dY_u}{dt} = -\frac{\dot{m}_{vap}}{m_d} \cdot Y_u \quad (9)$$

Zbog procesa isparavanja vode masa kapljice će opadati. Promjena mase kapljice se računa s jednadžbom:

$$\frac{dm_d}{dt} = -\pi \cdot D_d \cdot \rho_{g,ref} \cdot \Gamma_{g,ref} \cdot Sh \cdot \ln(1 + B_M) \quad (10)$$

Promjena mase kapljice proporcionalna je  $D_d$  promjeru kapljice,  $\rho_{g,ref}$  prosječnoj gustoći plinovite faze,  $\Gamma_{g,ref}$  prosječnom difuzijskom koeficijentu plinovite faze,  $Sh$  Sharewoodovom broju te prirodnom logaritmu Spaldingova broja prijenosa mase uvećanom za jedan.

Spaldingov broj transporta mase je kvocijent razlike  $Y_{vap,s}$ , isparenog masenog udjela na površini kapljice, i  $Y_{vap,g}$ , isparenog masenog udjela u plinovitoj fazi, i masenog udjela kapljevine faze.

$$B_M = \frac{Y_{vap,s} - Y_{vap,g}}{1 - Y_{vap,s}} \quad (11)$$

Zbog relativno vrućih ispušnih plinova, ubrizgane kapljice su zagrijavane ali isto tako i hladene kao posljedica procesa isparavanja. Temperaturna promjena kapljice tako ovisi i o zagrijavanju i o hlađenju zbog isparavanja kao što se vidi iz jednadžbe:

$$\frac{dT_d}{dt} = -\frac{\dot{m}_{vap}}{m_d \cdot c_{p,d}} \cdot \left( \frac{c_{p,vap,ref} \cdot (T_g - T_d)}{B_T} - h_{vap} \right) \quad (12)$$

Gdje je  $T_d$  temepearatura kapljice,  $\dot{m}_{vap}$  ispareni maseni tok kapljice,  $c_{p,d}$  specifični toplinski koeficijent kapljice,  $c_{p,vap,ref}$  prosječni specifični toplinski koeficijent pare na konstantnom tlaku,  $T_g$  temperatura plinova i  $h_{vap}$  specifična entalpija pare.  $B_T$  je Spaldingov broj transporta topline za plinovitu fazu u kojem  $T_s$  odgovara temperaturi zasićenja.

$$B_T = \frac{c_{p,vap,ref} \cdot (T_g - T_s)}{h_{vap}} \quad (13)$$

### 2.5.2. Model isparavanja UWS-a pri temperaturi $T=100^\circ\text{C}$

Kad se kapljica zagrijava dosegnut će temperaturu ključanja. Kad dosegne temperaturu ključanja pretpostavlja se da kapljica ostaje na konstantnoj temperaturi. Isparena masa se može računati pomoću jednadžbe:

$$\frac{dm_d}{dt} = -\pi \cdot D_d \cdot \frac{\lambda_{g,ref}}{c_{p,vap,ref}} \cdot Nu \cdot \ln(1 + B_T) \quad (14)$$

Gdje je  $\lambda_{g,ref}$  prosječni koeficijent toplinske vodljivosti plinova, a  $Nu$  Nuseltov broj.

### 2.5.3. Termoliza UWS-a

Nakon što cjelokupni sadržaj vode ispari iz kapljice, ostaje samo kruta ureja. U realnosti ureja se prvo rastali i onda počne proces dekompozicije u amonijak i isocijaničnu kiselinu, ali u teoriji ovo je zanemareno i Arrheniusova jednadžba je upotrijebljena da bi se računao kemijski proces. Arrheniusov izraz pokazuje koliko brzo će se kemijska dekompozicija ureje odvijati kao funkciju temperature. U Arrheniusovom izrazu frekvencijski faktor A je empirijska konstanta za računanje dekompozicijske mase bazirana na temperaturi. Energija aktivacije  $E_a$  je količina energije potrebne da bi se započela kemijska reakcija. Promjena količine mase čiste ureje je opisana sa:

$$\frac{dm_u}{dt} = -\pi \cdot D_d \cdot A \cdot e^{(-E_a/R \cdot T_d)} \quad (15)$$

Toplinski tok prema i od krute kapljice ureje može biti izračunat. Toplinski tok  $q_d$  ovisi o temperaturnoj razlici između ispušnih plinova i kapljice, modificiranom Nuseltovom broju  $Nu^*$  i promijeni unutarnje energije dekompozirane kapljice kako je pokazano u jednadžbi:

$$q_d = \pi \cdot D_d \cdot \lambda_{g,ref} \cdot Nu^* \cdot (T_g - T_d) + \frac{dm_u}{dt} \cdot h_{th} \quad (16)$$

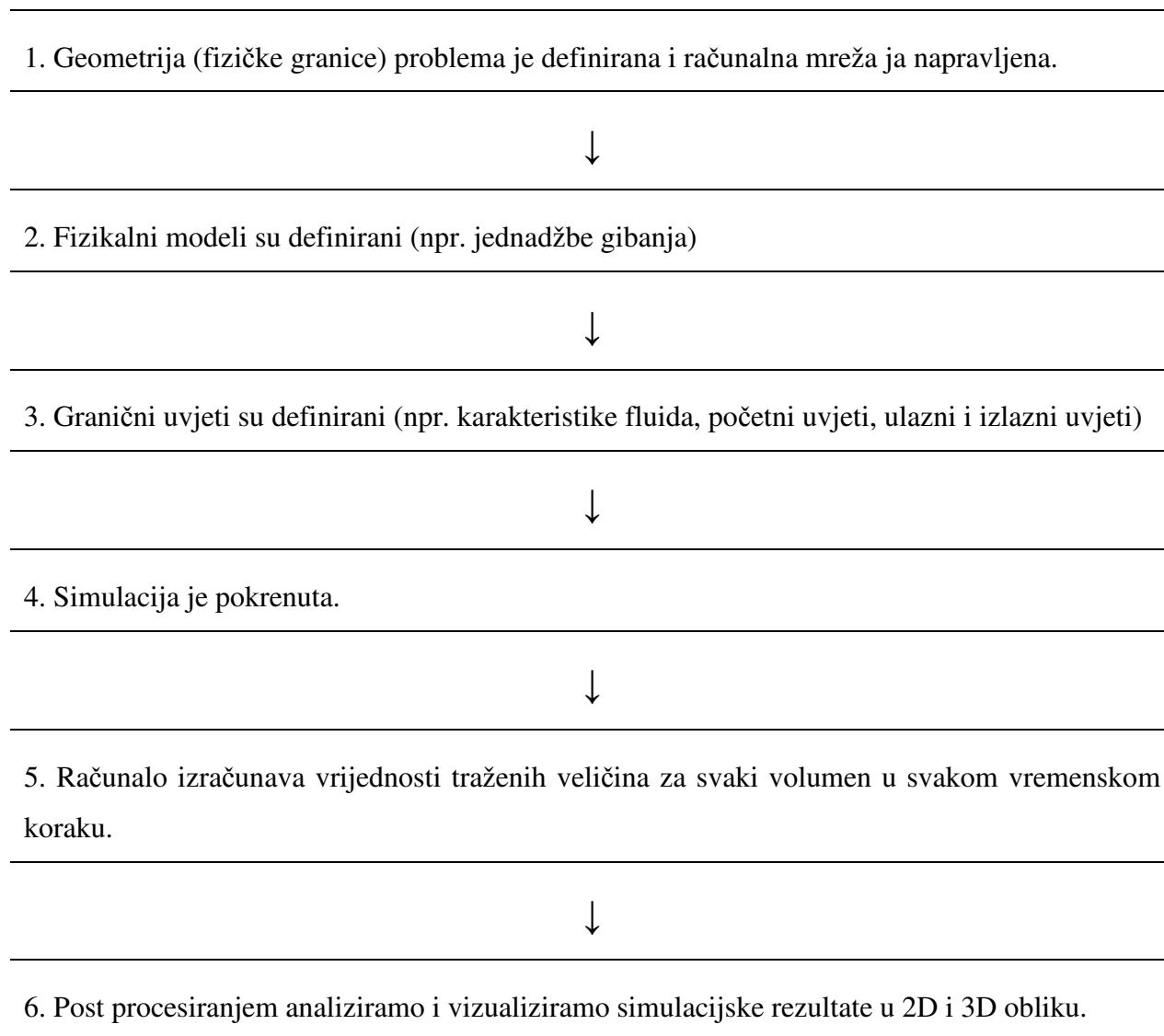
U jednadžbi (16)  $h_{th}$  predstavlja specifičnu entalpiju hidrolize.

### 3. PRINCIPI NUMERIČKIH SIMULACIJA

#### 3.1. Osnove numeričkih simulacija

Računalna mehanika fluida (RMF) je dio mehanike fluida koji koristi numeričke procedure i algoritme za rješavanje i analiziranje problema vezanih za strujanje fluida. Ova računanja su upotrijebljena da bi se predvidjelo ponašanje fluida i interakcija fluida s njegovom okolinom. Danas postoji nekoliko različitih RMF softvera na tržištu. Softver koji će biti upotrijebljen u ovom radu je AVL-ov "Fire". "Fire" je baziran na metodi kontrolnih volumena. Metoda kontrolnih volumena u RMF-u temelji se na principima osnovnih jednadžba očuvanja za veličine koje opisuju ponašanje materije kad je ona u interakciji sa svojom okolinom. To znači da je domena simulacije sastavljena od konačnog broja volumena. Svaki od ovih volumena se ponaša kao zasebni kontrolni volumen za koji će biti sastavljen set numeričkih jednadžbi da bi se došlo do rješenja ekstenzivnih veličina karakteristika fluida za taj volumen. Za svaki ovaj pojedini kontrolni volumen osnovne jednadžbe očuvanja su rješavane u danom vremenskom koraku.

Cjelokupna procedura za svaku numeričku simulaciju može biti podijeljena u tri djela. Prvi dio je najčešće poznat kao pred-procesuiranje. Pred-procesuiranje obuhvaća formulaciju problema, izgradnju računalne mreže, namještanje osnovnih jednadžbi, namještanje graničnih uvjeta na rubnim dijelovima promatrane geometrije itd. U dijelu pred-procesuiranja mi definiramo naš problem. Drugi dio je rješavanje. Ovaj dio uključuje diskretizaciju osnovnih jednadžbi i numeričko rješavanje istih. Treći dio je post-procesuiranje ili obrada rezultata. Ovaj dio se koristi za grafičku vizualizaciju i analizu simulacijskih rezultata. Tok cjelokupne procedure je dan u tabeli na sljedećoj strani.

**Tabela 1: Tok simulacije.**

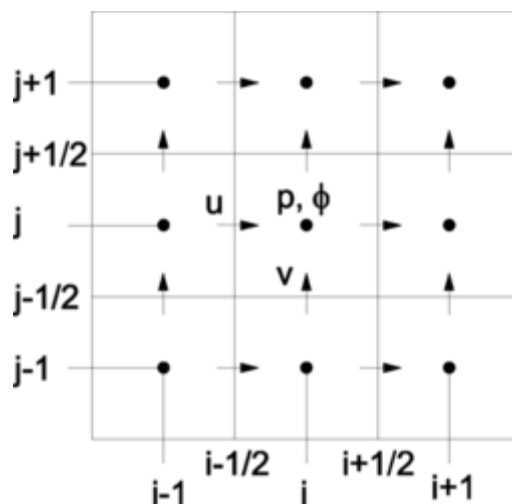
### **3.2. Prostorna i vremenska diskretizacija**

RMF nudi dva načina proračunavanja strujanja fluida. Stacionarno stanje je ono kad su svi uvjeti strujanja stacionarni i kad su sve veličine strujanja stacionarne. Za ovakve vrste strujanja postoji jedinstveno rješenje gdje za zadane ulazne veličine odnosno rubne uvjete u promatranoj geometriji u svakoj točki imamo jedinstveno i konstantno rješenje u svakom vremenskom koraku. Kad se veličine strujanja mijenjaju ili se granični uvjeti mijenjaju u vremenu tako da imamo ne stacionarno stanje strujanja fluida tada za svaki vremenski korak imamo novo rješenje. Da bi analizirali ponašanje fluida moramo naći rješenje za svaki vremenski korak. Definiranje veličine vremenskog koraka se naziva vremenska diskretizacija.



Rješenje je tada dano kroz broj definiranih vremenskih koraka. Prvi vremenski korak koristi početne uvjete definirane od strane korisnika, svaki sljedeći koristi dobivene vrijednosti izračunate u prethodnom vremenskom koraku. Iz ovoga zaključujemo da će veličina vremenskog koraka imati utjecaj na točnost dobivenih rezultata. U principu što je manji vremenski korak imat ćemo bolje rješenje ponašanja fluida. Manji vremenski korak također znači i više vremena potrebnog da bi računalo došlo do rješenja. Da ne bi simulacije trajale predugo moramo naći kompromis između dovoljne točnosti i vremena koje je potrebno da simulacija završi.

Prostorna diskretizacija je povezana s geometrijskom domenom strujanja fluida tako da označava podjelu iste na konačan broj kontrolnih volumena. Za svaki pojedini kontrolni volumen traži se rješenje. Ovi kontrolni volumeni diskretiziraju geometrijski računalni prostor koji onda gradi mrežu. Svrha mreže je da rastavi domen u strujanja na konačan broj ne preklapajućih kontrolnih volumena (ili ćelija) da bi se stvorila numerička mreža. Mreže mogu biti strukturirane ili nestrukturirane, ovisi o oblicima kontrolnih volumena od kojih su građene. Najčešće upotrjebljeni oblici su kvadar, prizma, tetraedar i piramida. Ploha svakog kontrolnog volumena je povezana s plohom nekog drugog kontrolnog volumena osim onih ploha koje čine granične plohe prostorne domene.



Slika 9: 2D prikaz prostorne diskretizacije strukturirane mreže.

### 3.3. Procedura rješavanja numeričkih simulacija

Za računalnu domen u s M brojem kontrolnih volumena potrebno je riješiti sistem od M puta N algebarskih jednadžbi za N nezavisnih varijabli. Jednadžbe su nelinearne i također uparene jer se više od jedne nezavisne varijable pojavljuje u svakoj jednadžbi. Zbog nelinearnosti

koriste se iterativne rješavačke tehnike. Postoje dva pristupa: upareni pristup (istovremeno) i odijeljen (pojedinačno). Rješavač koji koristi "Fire" se služi odijeljenim pristupom. U svakoj jednadžbi razmatrana nezavisna varijabla je odvojena kao jedina nezavisna varijabla jer se ostale nezavisne varijable tretiraju kao poznate. Ovo vodi do pod-seta od  $M$  linearnih algebarskih jednadžbi. Pozitivna stvar ovog pristupa ta što se tako koristi puno manje memorijskog prostora za razliku od uparenog pristupa.

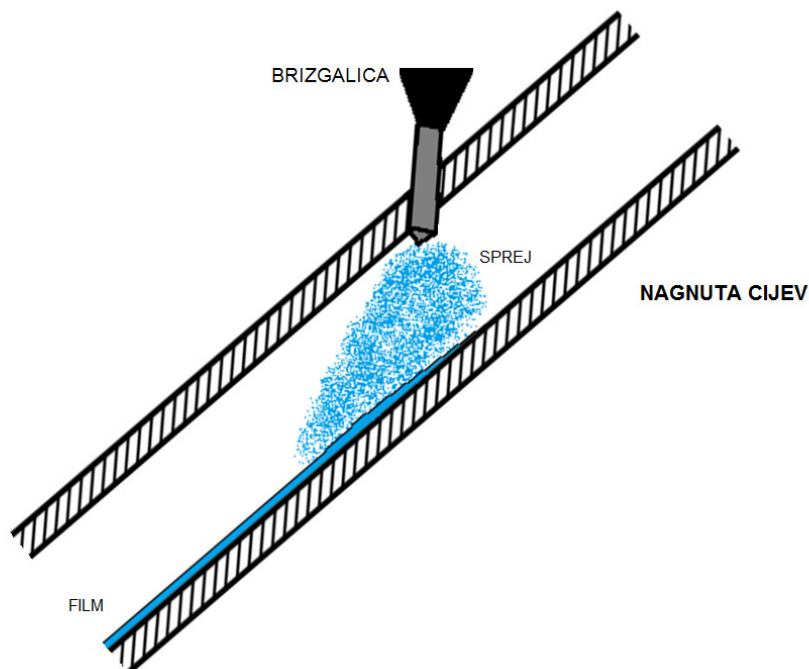
Osnovna procedura dolaska do rješenja za svaku simulaciju ide kroz korake kako je prikazano na tabeli 1 (Tabela 1: Tok simulacije.). Svaki od ovih koraka mora biti pažljivo analiziran i specificiran da bi se računalnom softveru dao pravi opis geometrije i procesa koji se žele simulirati. Čak i mala greška može imati značajan utjecaj na konačne rezultate.

## 4. SIMULACIJA UBRIZGAVANJA TEKUĆINE U OBLIKU SPREJA U NAGNUTU CIJEV KROZ KOJU STRUJI ZRAK

### 4.1. Uvod

Simuliranje ubrizgavanja tekućine u obliku spreja u nagnutu cijev s obzirom na smjer djelovanja gravitacije kroz koju struji zrak odgovara procesima koji se odvijaju u usisnoj cijevi motora s unutrašnjim izgaranjem [11]. Da specificiramo ova simulacija bi više odgovarala onim motorima kod kojih se mješavina za izgaranje formira u usisnoj cijevi prije ulaska u cilindar. Ubrizgana količina goriva je kontrolirana preko ECU jedinice (*eng. Electronic Controlling Unit*) te se na taj način elektronskim putem regulira snaga motora. U slučaju da ubrizgano gorivo ne uspije potpuno ispariti u cilindar ulazi manje goriva od željenog i s tim pada i snaga motora. Ako brizgaljka nije dobro postavljena i geometrija cijevi oko brizgaljke nije pogodna za potpuno isparavanje goriva, može doći do nakupljanja goriva u obliku kapljevine u usisnoj cijevi. Najčešće dolazi do stvaranja filma kapljevine na mjestu gdje sprej dolazi u kontakt sa stjenkom cijevi. Nakupljena kapljevina i dalje isparava, ali ukoliko ne uspije kompletno ispariti između dva ciklusa ubrizgavanja dolazi do akumulacije i laganog stvaranja potoka koji je nošen strujanjem zraka. Ovakve situacije su nepoгодne u radu motora i nastojimo ih svakako izbjeći.

Simulacija će se provesti na način da će se na određenu geometriju cilindričnog oblika zadati svi uvjeti koji odgovaraju gore navedenim procesima [12]. Ta geometrija će odgovarati komadu odsječene cijevi kroz koju struji zrak i koja na sebi ima postavljenu brizgaljku. Tako će biti definirani ulaz i izlaz iz cijevi kao i položaj brizgaljke i njen kut (odnosno sapnica i kut ubrizgavanja spreja). Duljina trajanja simulacije bit će određena stvaranjem ustaljenih kvazistacionarnih uvjeta, odnosno odgovarat će onom vremenu nakon kojeg se svi fenomeni koji se pojavljuju pri simulaciji ustale. Nakon toga će se analizirati dobiveni rezultati debljine kapljevitoг sloja koji se stvori i njegova rasprostranjenost po površini.



Slika 10: Shema postavki simulacije.

## 4.2. Postavke RMF simulacije

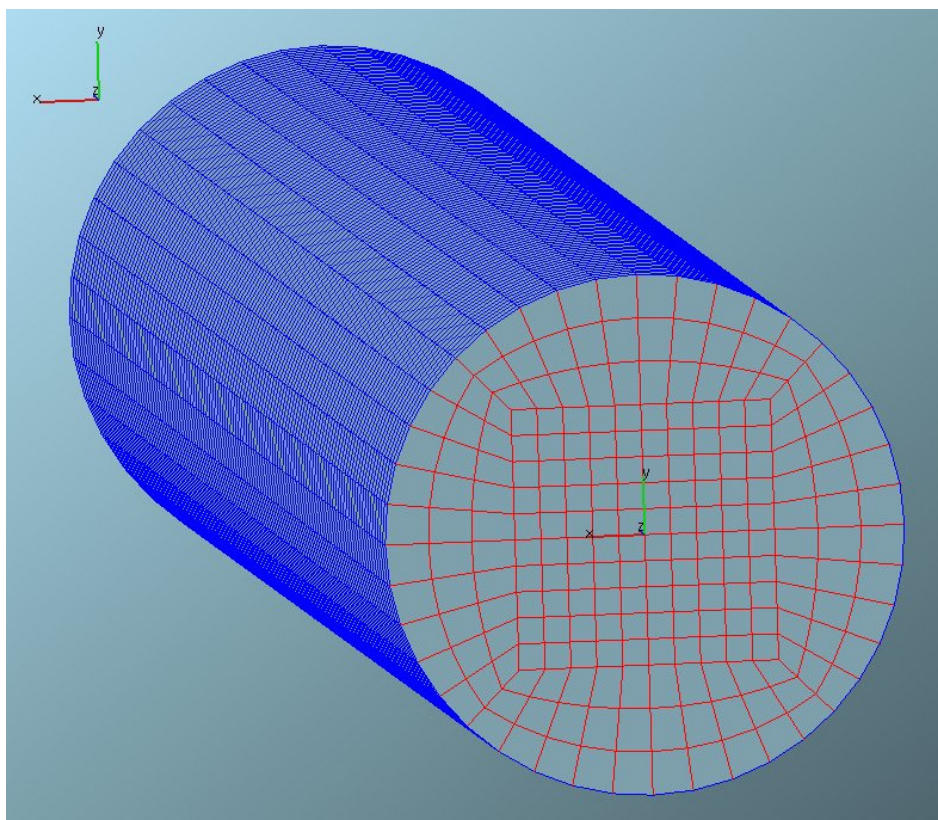
### 4.2.1. Osnovni pristup kod upotrebe "Fire" softvera

Upotrebljavani softver za RMF u ovom radu je AVL "Fire" v.2008.2. "Fire" je metodi na pristupu konačnih volumena. Odijeljena (sekvencijalna) iterativna tehnika se koristi u "Fire-u" za rješavanje numeričkih jednadžbi. "Fire" nudi set modela i pod modela koje možemo koristiti za specificiranje procesa koje simuliramo. Ovi modeli se lako aktiviraju i uključuju u proces ako su potrebni (npr. wall film modul, spray modul, thinwalls modul itd.). Ovo čini Fire vrlo jednostavnim softverom za korisnika. Također osnovna podjela RMF softvera na pred procesiranje, rješavanje i post procesiranje je vrlo jasno vidljiva kod "Fire-a" pa je tako razumljiv za korisnika.

Svaki od ovih koraka mora biti pažljivo analiziran i determiniran da bi se računalnom softveru dao pravi opis procesa koji se žele simulirati. Čak i mala greška može imati značajan utjecaj na konačne rezultate.

#### 4.2.2. Mreža

Referentna mreža koja se koristi kod simulacija je napravljena upotrebom alata "Fire topology tool". Ta mreža je napravljena iz geometrije cilindričnog oblika i sastavljena je od dva dijela. Jezgru mreže čine volumeni kvadarskog oblika. Da bi se na kraju formirala cilindrična geometrija ta jezgra je obavijena cilindričnim oplošjem odnosno volumenima koji su rezultat diskretizirane cijevne stjenke. Ovako je dobivena stabilnija mreža za numeričku proceduru. Promjer cilindrične geometrije koju tvori mreža je 36 mm, a duljina 200 mm. U "Fire-u" brizgaljku ne definiramo kao neku posebnu geometriju. "Fire" kao opciju nudi zamjenu brizgaljke samo točkom koja predstavlja sapnicu. Ova točka se ponaša kao izvor kroz koji se tekućina u obliku spreja ubacuje u računalnu domenu. Lokacija ove točke je specificirana od strane korisnika i za simulaciju točka je postavljena 30 mm od ulaza na gornjoj strani cijevi. Mreža je građena od ukupno 26400 kontrolnih volumena.



Slika 11: Prikaz mreže.

Da bi razmotrili utjecaj mreže na simulaciju još neki oblici mreža su korišteni. Promatrani su veličina volumena i struktura mreža. Sprej i tekući film imaju posebne zahtjeve prema veličini volumena i vremenskom koraku zbog složenijih numeričkih procedura. Male vrijednosti

debljine filma i promjera kapljica su glavni uzroci ovih zahtjeva. Rezultati ovih razmatranja će biti predstavljeni u kasnije.

#### **4.2.3. Vremenski korak**

Procesi koji se odvijaju u ovoj simulaciji su ne stacionarni i rješenje simulacije je dano kroz konačan broj vremenskih koraka. Vremenski korak također ima utjecaj na razvoj spreja i tekućine filma na stjenci i zato mora biti pažljivo odabran. Sprej se impulsno ubrizgava u cijev pa prema tome možemo podijeliti vrijeme jednog ciklusa na dva dijela. Prvi dio je vrijeme dok se sprej ubrizgava u cijev, a drugi dio bi bilo vrijeme između dva ubrizgavanja. Zbog razvoja spreja potreban nam je manji, finiji, vremenski korak dok se fluid ubrizgava. Prestankom ubrizgavanja možemo koristiti veći vremenski korak. Na ovaj način je napravljen kompromis između preciznosti rješenja i vremena koje nam je potrebno da dođemo do rješenja. Napravljeni su tri testa s različitim vremenskim koracima da bi se promotrio utjecaj vremenskog koraka. Vrijednosti vremenskih koraka koji su testirani su 0.00001 s, 0.00005 s, 0.0001 s za slučaj dok se sprej ubrizgava u cijev i 0.0005 s, 0.001 s, 0.005 s za vrijeme između dva ubrizgavanja. Za prvi dio procesa odabran je vremenski korak od 0.00005 s, a za drugi vremenski korak od 0.001 s. Ovi vremenski koraci su korišteni u svim daljnjim simulacijama. Testiranje vremenskih koraka je pokazalo da manji vremenski koraci od ovih ne donose značajnije poboljšanje rješenja.

#### **4.2.4. Postavljanje graničnih uvjeta**

Opisivanje procesa koji se odvijaju u ovoj geometrijskoj domeni zahtjeva definiranje graničnih uvjeta prije početka simulacije. Tu su tri različita procesa koja se mogu odvojiti i čiji se granični uvjeti trebaju definirati. To su glavno strujanje kroz cijev, sprej, i stvaranje i strujanje tekućeg filma. Da bi se definirali granični uvjeti prvo moraju biti definirane površine na geometrijskoj domeni.

Definirane površine na geometrijskoj domeni su ulaz, izlaz i stjenka cijevi. Prvo se definira fluid koji struji kroz cijev. Za sve pogonske uvjete koji su simulirani ovaj fluid je zrak pri normalnom stanju. Na ulazu se definira maseni protok kroz ulaz, temperatura fluida, i karakteristike turbulencije (kinetička energija turbulencije, visina turbulencije itd. ). Granični uvjet koji je zadan na izlazu je statički tlak. Na površini koja predstavlja stjenku definirana je

temperatura i hrapavost stjenke. Za sve pogonske uvjete pretpostavljena je idealno glatka stjenka. Upotrebom spomenutih graničnih uvjeta strujanje kroz cijev je definirano i može biti izračunato stanje u svakom volumenu domene u svakom vremenskom koraku.

Implementacija još dva procesa u zadanu geometriju također zahtjeva definiranje graničnih uvjeta ovih procesa. Već je prije spomenuto da je brizgaljka predstavljena točkom koja u biti predstavlja sapnicu te brizgaljke. Kroz ovu točku sprej se uvodi u geometrijsku domenu. Prvo se mora definirati fluid koji se ubrizgava. Ovaj fluid je N-oktan za sve pogonske uvjete koji su simulirani. Ovaj fluid je uveden u simulaciju kao čestice koje napuštaju sapnicu i razbijanjem stvaraju sprej. Zbog toga je u "Fire-u" potrebno definirati broj čestica koje napuštaju sapnicu. To se radi pomoću tri faktora. Oni se nazivaju NSIZES, NINTRO i NCIRCD. NSIZES je broj koncentričnih krugova sapnice iz kojih se čestice ubacuju. NINTRO je broj lukova na koje je podijeljena sapnica iz kojih izlaze čestice fluida. NCIRCD je broj okruglih dijelova sapnice iz kojih čestice izlaze. Ukupan broj čestica koje su uvedene iz sapnice u svakom vremenskom koraku iznosi NINTRO puta NCIRCD puta NSIZES. Nakon toga se definira temperatura fluida i ukupna količina ubrizganog fluida za cijelu simulaciju. Geometrija sapnice je definirana od strane korisnika kroz ponuđene specifikacije sapnice (pozicija, smjer, promjer sapnice, broj rupa na sapnici, itd.). Na kraju još moraju se definirati podaci za kapljice kao što su početna brzina, vanjski promjer, veličina kapljica, itd.

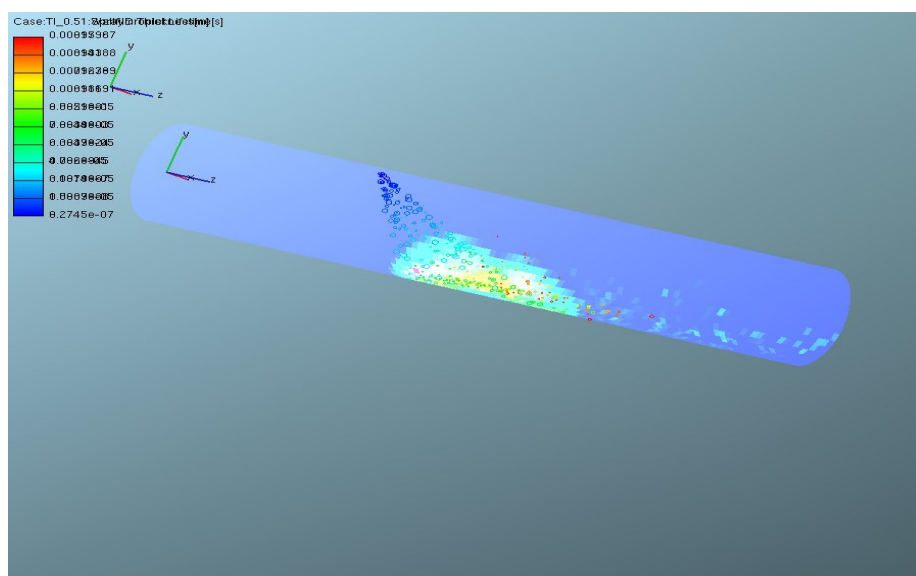
Granični uvjeti za tekući film na stjenci traže jedino da se definira kako je film unesen u domenu. To može biti dano na tri načina: sprej, izvor, sprej i izvor. Za sprej rješavač će sam proračunati film, ali za izvor korisnik sam mora definirati položaj i količinu filma koju izvor daje sustavu.

### 4.3. Pregled simulacija

Cilj ovih simulacija je da se na kvalitetan način preslikaju procesi koji se odvijaju u realnim uvjetima. Da bi se to ostvarilo sve fizikalne karakteristike procesa moraju odgovarati fizikalnim karakteristikama koje se odvijaju u stvarnosti. Međutim svako mjerenje ima svoju toleranciju i zato mora biti uzeta u obzir određena greška mjerenja. Numeričke procedure također imaju svoju grešku koju unose u simulacijske rezultate. Međutim najbitnije za znati je da se numeričkim simulacijama ne mogu posve precizno prenijeti svi fizikalni i kemijski procesi koji se odvijaju u realnom svijetu zbog uvođenja pojednostavljenja u matematičke modele. Empirijski i polu empirijski izrazi su vrlo često upotrebljavani da bi se korigirala ova

pojednostavljenja i da bi se u obzir uzeli i procesi koje nije jednostavno modelirati. Zbog svega ovoga moramo biti svjesni nesavršenosti numeričke simulacije.

Simulira se nekoliko pogonskih uvjeta. Oni odgovaraju različitim graničnim uvjetima koji se nameću simulaciji. Tako će se varirati ubrizgana količina goriva, frekvencija ubrizgavanja i položaj brizgalice. "Fire" nudi nekoliko različitih pod-modela koji se mogu koristiti da se opišu procesi koje se simulira. Svaki od ovih pod-modela ima svoje prednosti i mane. U priručnicima za "Fire" možemo vidjeti u kojim slučajevima je preporučeno upotrebljavati neki od modela. Kombinacijom ovih modela i njihovih parametara će se pokušati dobiti odgovarajući opis procesa koje se želi simulirati.



**Slika 12: Simulacija ubrizgavanja spreja u nagnutu cijev.**

Sprej, film na stjenci i glavno strujanje zahtijevaju da određene postavke budu definirane putem grafičkog korisničkog sučelja (*eng. Graphical User Interface – GUI*) da bi rješavač mogao rješavati pojedine slučajeve simulacije. Ove postavke definiraju matematičke modele koji će biti upotrjebljeni u rješavaču da bi se proračunala simulacija koju korisnik želi. Matematički modeli mogu biti izvedeni iz teorijske, empirijske i polu empirijske pozadine. Tako imamo nekoliko različitih modela koji mogu biti upotrjebljeni da bi se opisao isti proces. Također imamo i nekoliko različitih numeričkih procedura koje se mogu koristiti za računanje. Od korisnika se traži da prepozna najbolju kombinaciju svih ovih postavki za željenu simulaciju.

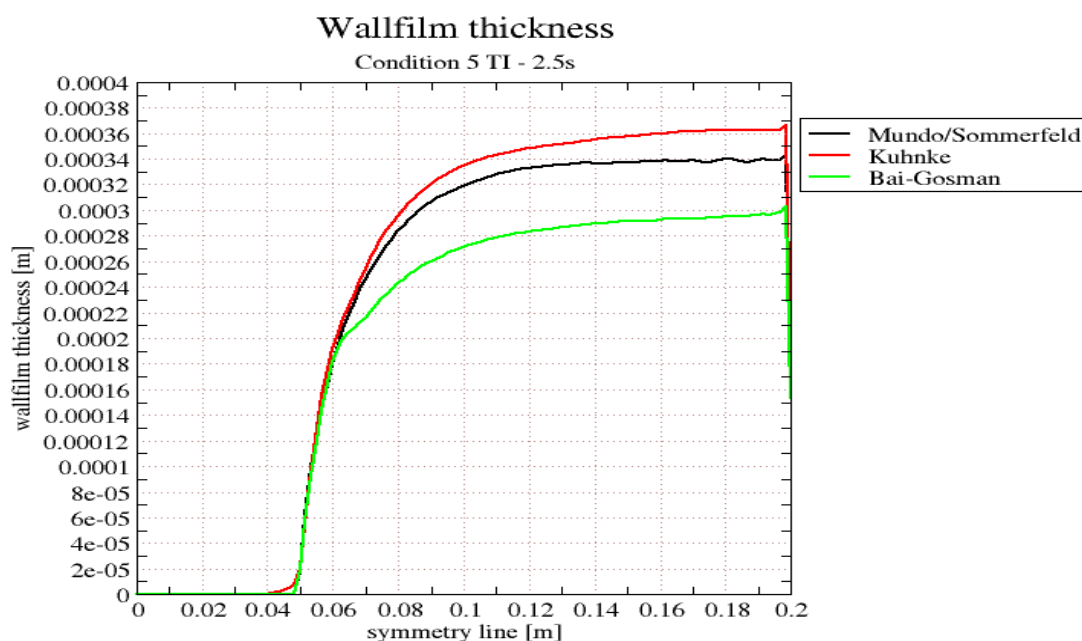
Tri osnovna zakona očuvanja koja su vezana za strujanje kroz cijev su zakoni očuvanja kontinuiteta, količine gibanja i energije. Aktivacijom u GUI-u uključujemo proračunavanje



modela koji predstavljaju očuvanje ovih zakona. Odabrani model turbulencije za sve simulacije je k-zeta-f [13]. Viskozno zagrijavanje i rad tlaka su također aktivirani. Model tretmana stjenke je hibridni tretman stjenke [14], a za model prijenosa topline kroz stjenku odabrana je standardna funkcija stjenke. Modeli spreja i tekućeg filma na stjenci zahtijevaju da se njihove postavke specificiraju. Modeli spreja koji mogu biti korišteni su model turbulentne disperzije, model interakcije kapljica, model interakcije stjenke i model isparavanja. Model turbulentne disperzije nudi nekoliko različitih matematičkih pristupa, ali u ovom radu je korišten najjednostavniji i ocijenjen je zadovoljavajućim za ovaj zadatak. Model interakcije kapljica je nije toliko bitan kad se izabire za definiranje spreja i on je kao model koji definira ponašanje kapljica za model spreja deaktiviran u nekim slučajevima. Interakcija kapljice se modelira kroz model tekućeg filma na stjenci kao izvor filma. Model interakcije stjenke je jedan od najbitnijih modela ovog zadatka i bit će posebno obrađen u daljnjem tekstu. Model isparavanja je također jako bitan, ali procijenjeno je da odabir "Dukowicz" modela [15] za model isparavanja s njegovim osnovnim postavkama je zadovoljavajući za ovaj rad u svim slučajevima. Model razbijanja je valni i nije jako značajan za ovaj zadatak. Model za film na stjenci zahtjeva od korisnika da definira koji je izvor filma u geometrijskoj domeni. Pod-modeli koji mogu biti manipulirani u modelu za film na stjenci su model isparavanja, model otkidanja, model prskanja i model energije. Kombinirani model je odabran za model isparavanja. Model otkidanja je "Schadel-Hanratty"[16]. Model prskanja je također jedan od primarnih zadataka ovog rada i bit će naknadno posebno diskutiran. Model energije zahtjeva samo da se dadu neke osnovne fizikalne karakteristike vezane za energiju kao što su toplinska vodljivost stjenke, procijenjena debljina filma i Nusseltov broj. Vrijednosti ovih karakteristika su uzete kao standardne.

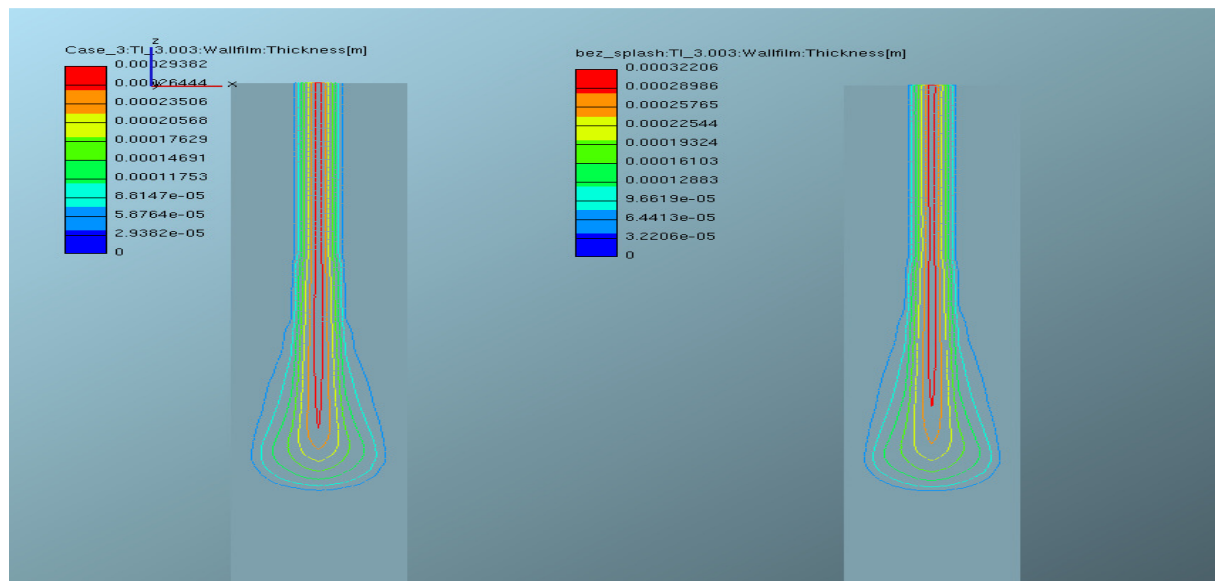
U ovom zadatku jedan od modela je posebno razmatran. To je model interakcije stjenke. Međutim ovaj model povezuje dva modela, sprej i film na stjenci. Ovaj model u spreju određuje kako će se ponašati kapljica kad udari u stjenku i primarni mu je zadatak očuvanje kapljice. U "Fire-u" je ponuđeno nekoliko modela interakcije stjenke u sprej modelu (walljet 0, walljet 1, walljet 2, BaiGosman, Amsden, O'Rourke, MundoSommerfeld, Reflection, itd.). Svaki od ovih modela ima svoju primarnu svrhu za upotrebu u ovisnosti o uvjetima u kojima se proces odvija. U "Fire" priručnicima svi ovi modeli su detaljno opisani. U modelu filma na stjenci model interakcije stjenke je razmatran malo drugačije. Primarni zadatak modela interakcije stjenke u modelu za film na stjenci je očuvanje filma. Zbog toga je model interakcije stjenke u modelu za film na stjenci razmatran kroz model za režim prskanja. Dva

modela za prskanje su ponuđena u "Fire-u" ("Mundo/Sommerfeld" i "Kuhnke"). Međutim uparivanjem ova dva modela, sprej i film na stjenci, zahtjeva da model interakcije stjenke računa samo kroz jedan od modela. To znači da ako je model interakcije stjenke deaktiviran u sprej modelu, model prskanja u modelu filma na stjenci će biti računat kao model interakcije stjenke. Ako je odabran neki od modela interakcije stjenke u sprej modelu tada će model prskanja u modelu za film na stjenci će biti zanemaren i sve što se tiče interakcije stjenke će biti računato kroz sprej model.



**Slika 13: Dobiveni rezultati debljine filma za korištene različite modele.**

Prvi simulacijski rezultati se mogu vidjeti nakon urađenih prvih test simulacija. Pregledom rezultata u post-procesiranju u 3D formi moguće je zamijetiti da površina prekrivena tekućinom filma je slična onoj iz dostupnih eksperimentalnih podataka, dok je najveća debljina filma je veća od onih koje pronalazimo u eksperimentalnim podacima. Ovo povećanje nije proporcionalno u odnosu na pogonske uvjete i varira od slučaja do slučaja.



**Slika 14: Prikaz prvih rezultata testnih simulacija.**

U prvom krugu testnih simulacija model interakcije stjenke je isključen i model prskanja je računat kroz model tekućine filma na stjenci. Za model prskanja je odabran Mundo/Sommerfeld [17][18]. Sve standardne postavke su korištene s ovim modelom. Minimalni omjer promjera prskanja i kapljice je stavljen na 0.1. Ove simulacije su nam dale prve rezultate.

Sljedeće što je bilo promatrano je što će se desiti kad model interakcije bude deaktiviran u sprej modelu i model prskanja bude deaktiviran u modelu filma na stjenci. Ovi rezultati će dati pregled koliki utjecaj ima model interakcije stjenke na razvoj filma tekućine. Rezultati su pokazali ogromno povećanje debljine filma. Ovo nam je pokazalo da prskanje ima velik utjecaj na razvoj filma tekućine i da bi trebalo biti modelirano pravilno. To vodi do istraživanja ostalih modela interakcije stjenke koji su ponuđeni u "Fire-u". Sljedeće testne simulacije su napravljene s aktiviranim modelom interakcije stjenke u sprej modelu. Preporučeni model za ovu svrhu je BaiGosman [19]. Ovaj model sadrži 4 parametra koja se mogu mijenjati. To su parametri W1, W2, W3 i W4. Standardne postavke su korištene za ovaj model. Vrijednosti parametara W1, W2, W3 i W4, su 57.5, 5, 0 i 0. Rezultati ovih simulacija su nam dali mnogo bolju podudarnost s dostupnim eksperimentalnim podacima. Površina prekrivena tekućinom filma je vrlo slična onima iz eksperimentalnih podataka. Ovi rezultati bi se mogli uzet kao zadovoljavajući.

Još jedan model prskanja koji nije korišten do sad je "Kuhnke" [6]. "Kuhnke" model prskanja je aktiviran u modelu filma na stjenci, a model interakcije u sprej modelu je opet deaktiviran.

Sve standardne postavke ovog modela su korištene bez ikakvih izmjena. Proračuni  
*Fakultet strojarstva i brodogradnje*

napravljeni ovim modelom nisu u rezultatima pokazali ništa što bi opravdalo njegovo daljnje istraživanje, pa se odustalo od ovog modela.

#### 4.4. Usporedba simulacija prema različitim pogonskim uvjetima

Upotrebom definiranih setova parametara koji se mogu mijenjati ostvareno je četiri različita pogonska uvjeta. Promatrani parametri su: frekvencija ubrizgavanja, trajanje ubrizgavanja, maseni protok zraka, ubrizgana količina u jednom ciklusu i pozicija brizgaljke. Pogonski uvjeti su prikazani tablično (Tabela 2: Tabela simuliranih pogonskih uvjeta.).

**Tabela 2: Tabela simuliranih pogonskih uvjeta.**

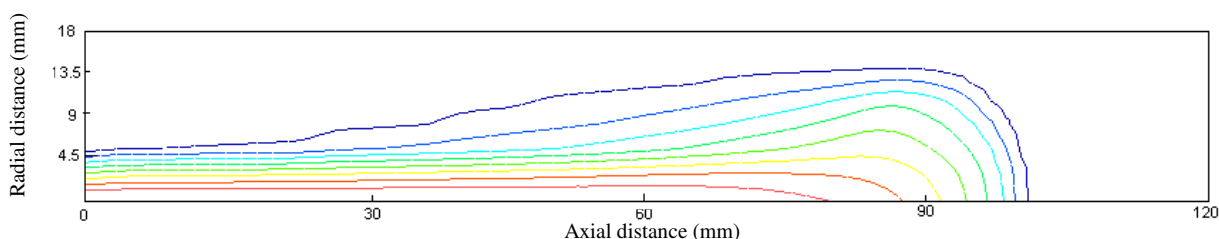
Pogonski uvjet	1	2	3	4
Broj okretaja motora (rpm)	2400	2400	4800	2400
Trajanje ubrizgavanja (CAD) <sup>1</sup>	97	188	194	97
Frekvencija ubrizgavanja (Hz)	20	20	40	20
Ubrizgana količina u jednom ciklusu (mm <sup>3</sup> )	21.5	43	21.5	21.5
Protok zraka (m <sup>3</sup> /min)	0.211	0.422	0.422	0.211
Kut brizgaljka/cijev (stupnjevi)	45	45	45	20

Za svaki od ovih pogonskih uvjeta upotrebom alata za obradu rezultata dobivena je mapa debljine tekućine filma na stjenci nakon 100 ciklusa ubrizgavanja.

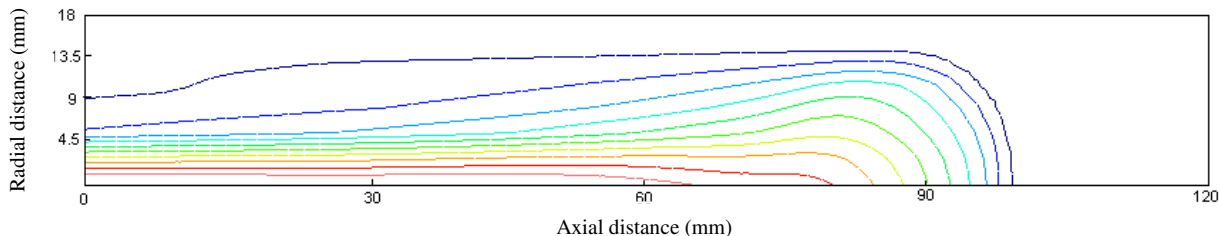
Prvi testni slučajevi kao što je već rečeno nisu koristili model interakcije stjenke. Glavni objekt razmatranja je bio model prskanja. Mundo/Sommerfeld model prskanja je aktiviran.

<sup>1</sup> CAD – Crank Angle Deegres (kut koji napravi bregasto vratilo)

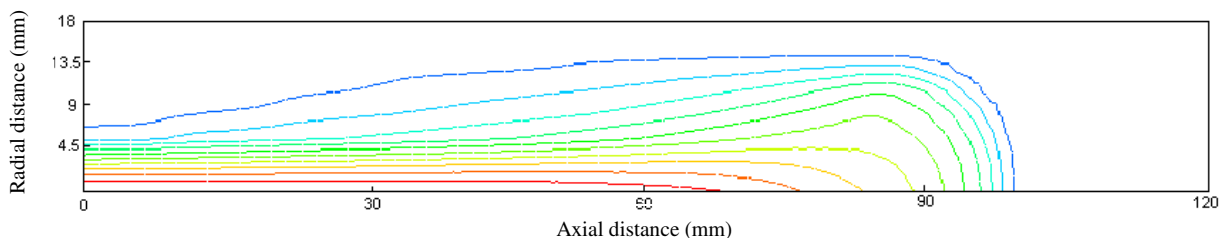
Upotrebom "Fire-ovih" post-procesuirajućih alata izrađeni su grafovi na kojima su prikazani rezultati (Slika 15, Slika 16, Slika 17, Slika 18). Ti grafovi su u biti mape debljine filma na rasprostranjenog po površini stjenke geometrije. Površina prekrivena filmom se prikazuje uporabom izolinija. Područje prikazano grafovima predstavlja duljinu od 120 mm nizvodno od položaja sapnice u grafovima za pogonske uvjete 1, 2 i 3. Za pogonski uvjet broj 4 područje prikazano grafom započinje 150 mm nizvodno od sapnice također ide sljedećih 120 mm. Korak između izolinija prikazuje razliku vrijednosti debljine filma u iznosu od 30 mikrona. Izolinije su prikazane u boji, gdje su boje poredane od plave do crvene ukazujući na porast debljine filma.



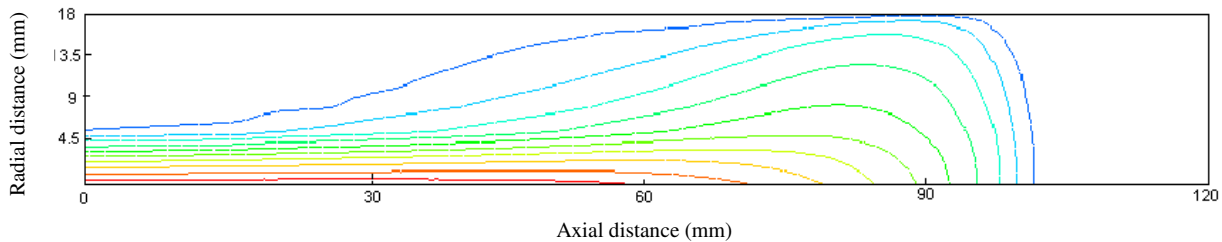
**Slika 15: Mapa debljine filma za pogonski uvjet br. 1.**



**Slika 16: Mapa debljine filma za pogonski uvjet br.2.**



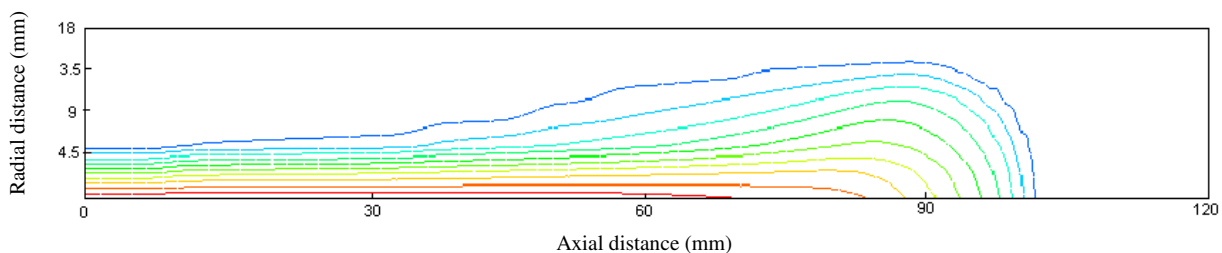
**Slika 17: Mapa debljine filma za pogonski uvjet br.3.**



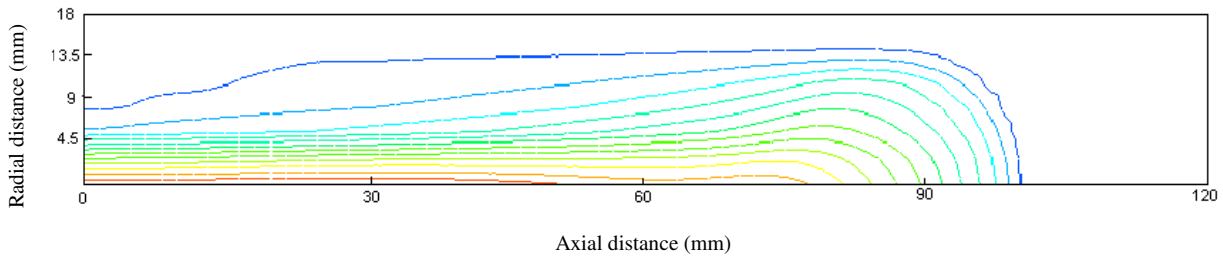
**Slika 18: Mapa debljine filma za pogonski uvjet br.4.**

Grafovi gore su prvi prikaz simulacijskih rezultata. Možemo zamijetiti uzorak po kojem se stvara film tekućine na površini cijevi. To nam pokazuje da "Fire-ov" model može kvalitativno preslikati fizikalne procese. Međutim ne možemo tu sagledati sve nesavršenosti realnih procesa koji se mogu dogoditi u realnim situacijama kao što su distorzija spreja, hrapavost površine, itd. Odnosno numeričkom simulacijom dobivamo potpuno simetričnu sliku. Maksimalna debljina filma koja se može naći za pogonski uvjet broj 1 je 280 mikrona. Također dobivene maksimalne debljine za pogonske uvjete 2, 3 i 4 iznose 345, 340 i 312 mikrona. Na grafovima se vidi i rasprostranjenost tekućine filma. Vrijednost ordinate pokazuje udaljenost od osi simetrije cijevi. Maksimalna vrijednost ordinate odgovara polumjeru cijevi.

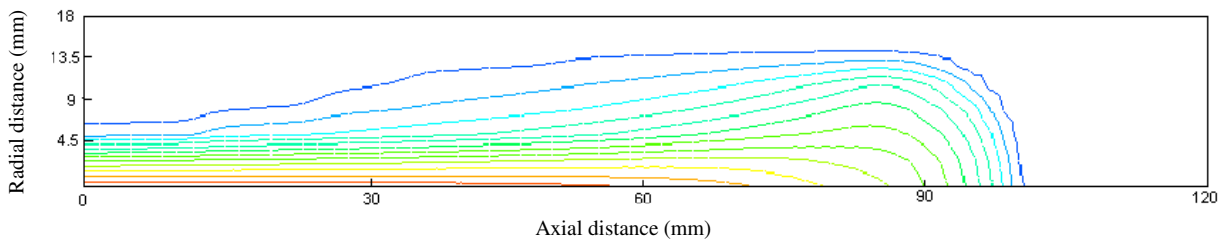
Da bi razmotrili valjanost prethodnih simulacija potrebno je izvršiti istraživanje utjecaja prskanja na razvoj filma tekućine. To se napravilo na način da se izostavilo prskanje iz proračunavanja i pratio razvoj stvaranja filma bez prskanja. Simulacije su napravljene sa svim istim postavkama kao i u prijašnjem slučaju samo je deaktivirano prskanje. Rezultati ovakvog modela su dani na sljedećim grafovima.



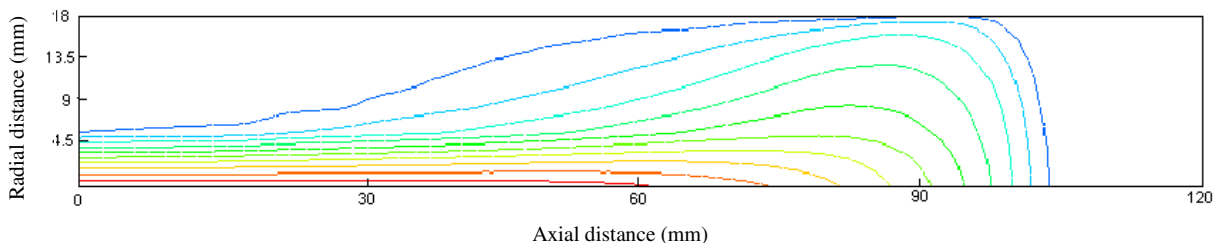
**Slika 19: Mapa debljine filma za pogonski uvjet br. 1.**



**Slika 20: Mapa debljine filma za pogonski uvjet br. 2.**



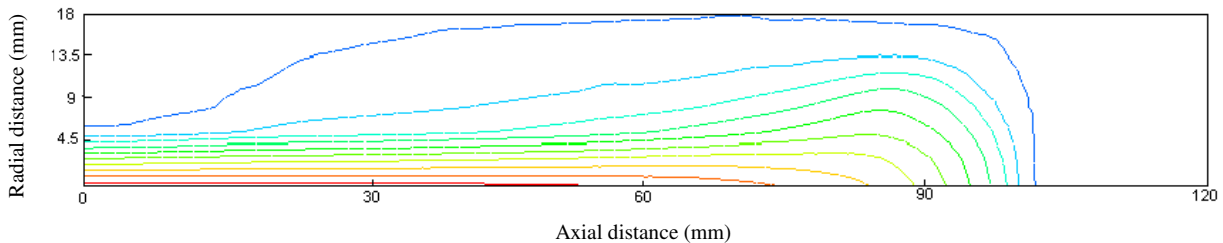
**Slika 21: Mapa debljine filma za pogonski uvjet br. 3.**



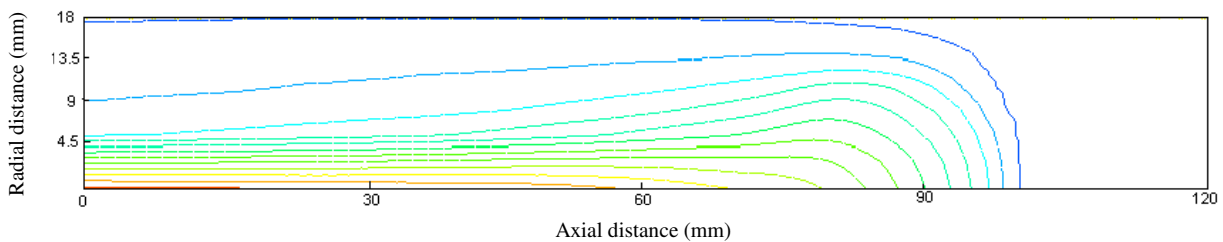
**Slika 22: Mapa debljine filma za pogonski uvjet br. 4.**

Iz grafova (Slika 19, Slika 20, Slika 21, Slika 22) se vidi da su razlike u površinama prekrivenim filmom jako male ako se uspoređuju prijašnjim simulacijski rezultatima. Velika razlika se pojavljuje kod vrijednosti maksimalnih debljina filma. Maksimalna debljina filma poraste za 30 do 40 mikrona u skoro svim pogonskim uvjetima osim u pogonskom uvjetu 4 s obzirom na prijašnju simulaciju s uključenim modelom prskanja. Iznimka u pogonskom uvjetu 4 može biti objašnjena dužim putem koje kapljice moraju prijeći da bi došle do stjenke pa zbog isparavanja i usporavanja kapljice gube svoju količinu gibanja i ne prave značajan efekt prskanja na površini. Na grafovima se također može vidjeti da su izolinje gušće slagane zbog većeg gradijenta porasta debljine filma. Pa sada maksimalne debljine filma tekućine u pogonskim uvjetima 1, 2, 3 i 4 iznose 315, 375, 380 i 312 mikrona. Zaključujemo da efekt prskanje ima značajan utjecaj na formiranje i razvoj filma i ne smije biti zanemaren.

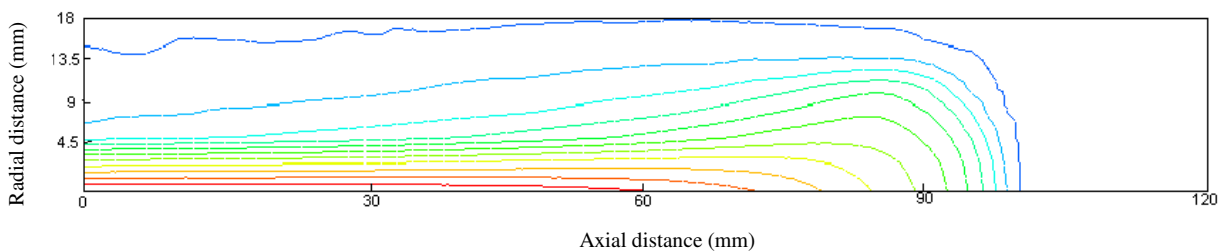
Simulacijski model sa uključenim efektom prskanja je proračunat još jednom, ali s drugačijim matematičkim modelom. Ovaj put odabrani model prskanja u modelu filma na stjenci je "Kunhke". Ovaj model također nudi nekoliko parametara s kojima se može manipulirati. U ovom slučaju su korištene standardne postavke ovog modela. Grafove dobivene ovim modelom možemo vidjeti dolje.



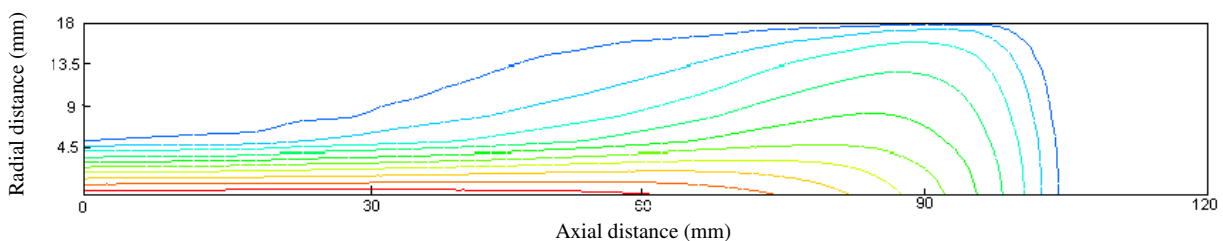
**Slika 23: Mapa debljine filma za pogonski uvjet br. 1.**



**Slika 24: Mapa debljine filma za pogonski uvjet br. 2.**



**Slika 25: Mapa debljine filma za pogonski uvjet br. 3.**



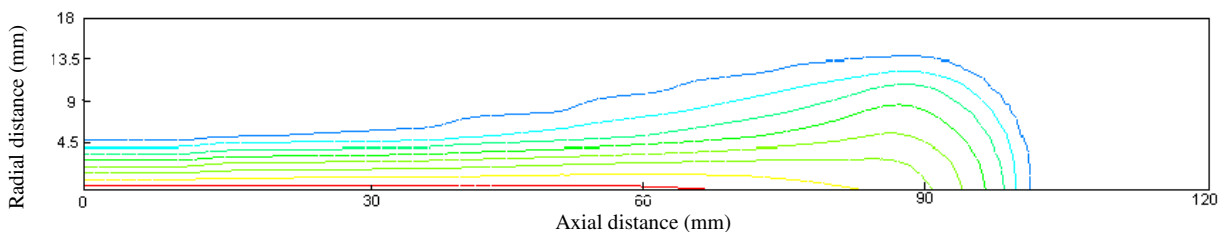
**Slika 26: Mapa debljine filma za pogonski uvjet br. 4.**



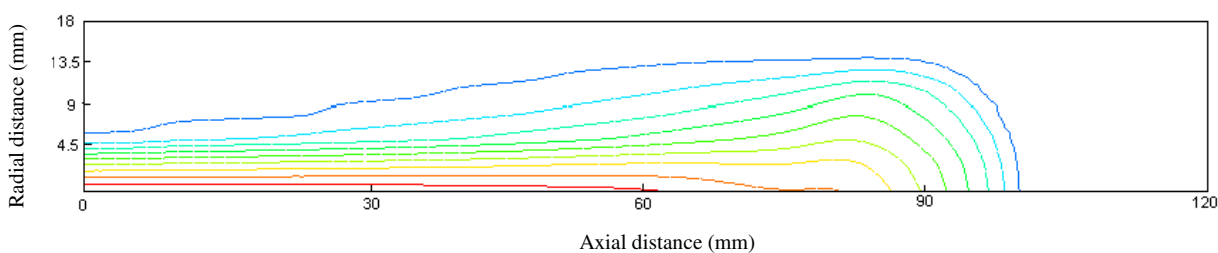
Iz ovih grafova se jasno vidi da ovaj model jako poveća površinu prekrivenu filmom tekućine. Vrijednosti maksimalne debljine filma koju imamo na mapama za pogonske uvjete 1, 2, 3 i 4 su 310, 360, 365 i 315 mikrona.

"Fire", kako je već objašnjeno prije, dozvoljava računanje interakcije stjenke kroz dva modela. Model interakcije stjenke se aktivira sa sprej modelom, ali ako je tamo deaktiviran onda jedan dio tog modela možemo računati kroz model filma na stjenci. Ako je aktiviran u sprej modelu sve što je namješteno u modelu filma na stjenci vezano za interakciju stjenke se zanemaruje.

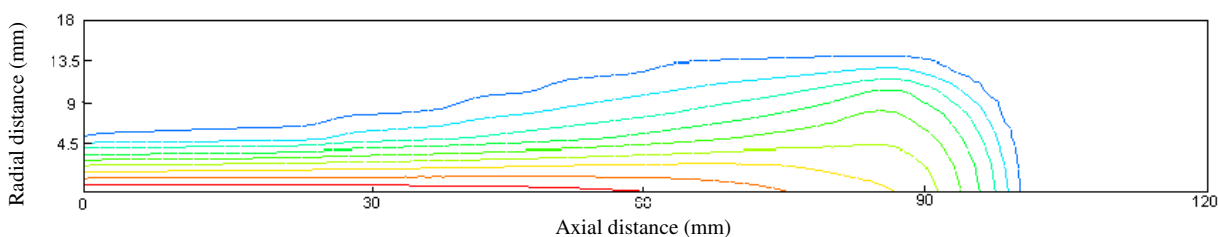
Sljedeće simulacije su računate sa aktiviranim modelom interakcije stjenke u sprej modelu. Odabrani model interakcije stjenke je "BaiGosman". Grafove koji donose rezultate debljine filma na stjenci možemo vidjeti dolje.



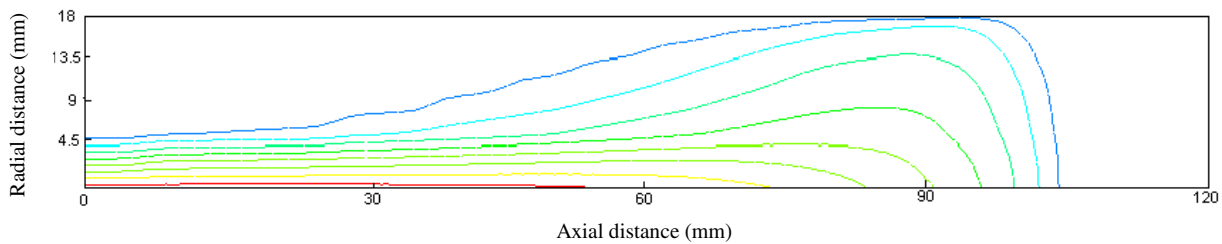
**Slika 27: Mapa debljine filma za pogonski uvjet br. 1.**



**Slika 28: Mapa debljine filma za pogonski uvjet br. 2.**



**Slika 29: Mapa debljine filma za pogonski uvjet br. 3.**



**Slika 30: Mapa debljine filma za pogonski uvjet br. 4.**

Vrijednosti maksimalne debljine filma su 245, 295, 290 i 240 mikrona za pogonske uvjete 1, 2, 3 i 4. Vrijednosti dobivene ovim modelom su niže od svih prijašnjih. Ovaj model kroz neke svoje parametre može biti još dodatno podešen kako bi što bolje odgovarao stvarnom procesu. Jedan od bitnijih parametara ovog modela je koeficijent kojim se modelira hrapavost stjenke. Hrapavost stjenke je bitan faktor kod formacije filma i ako se ovaj koeficijent pravilno postavi u svezi sa odgovarajućim materijalom i obradom površine realni proces se može još preciznije simulirati.

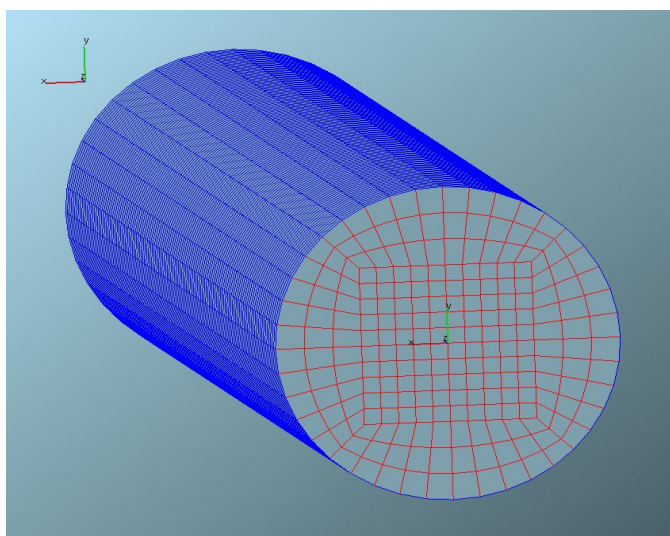
Usporedbom rezultata simulacija dobivenih uporabom različitih modela dolazimo do uviđaja u razlike među tim modelima. Međutim numeričke simulacije imaju još dvije bitne stvari čiji utjecaj na rezultate može biti značajan. To su vremenska i prostorna diskretizacija. Već je spomenuto da je provjerena vremenska diskretizacija i da korištenje manjeg vremenskog koraka ne doprinosi značajno točnosti rezultata. Promjene zamijećene uporabom manjeg vremenskog koraka su ispod 0.1%. Prostornu diskretizaciju je kompliciranije provjeriti s obzirom na proces koje simuliramo. U ovim simulacijama možemo razlučiti tri procesa koja se simuliraju. To su strujanje zraka kroz cijev, ubrizgavanje fluida u obliku spreja i razvoj i strujanje filma tekućine na stjenci. Na računanje veličina svakog od ovih procesa utjecaj veličine volumena mreže je različit.

#### **4.5. Provjera valjanosti mreže**

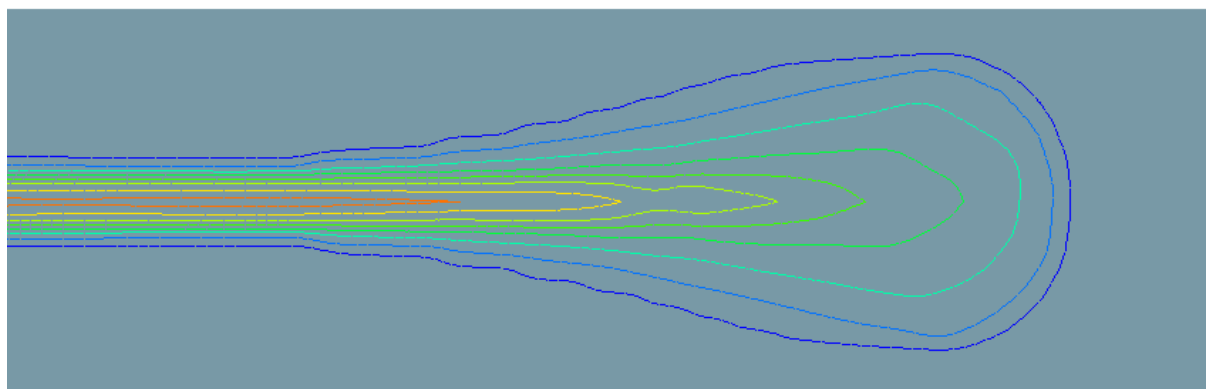
Provjera valjanosti prostorne diskretizacije je napravljena uvođenjem novih struktura mreža iste geometrije u simulacije. Smanjujući veličinu volumena dolazimo do točnijeg rezultata. Ali smanjujući veličinu volumena također povećavamo broj jednačbi koje se moraju riješiti za zadanu domenu i tako povećavamo potrebno računalno vrijeme da bi došli do rješenja. Mreža korištena u ovoj provjeri valjanosti ima veličinu volumena oko 8 puta manju od dosadašnje. Također je donošen zaključak da bi i struktura mreže mogla imati utjecaj na procese koji se odvijaju pa su tako načinjene i nove mreže drugačije strukturirane. Zadnji

korak je bio da se napravi mreža sa smanjenom veličinom volumena samo na mjestima gdje se može smatrati da takav volumen može dovesti do točnijih rezultata. To je u zoni gdje se stvara film tekućine. Provjera standardne mreže koja je dosad korištena je napravljena tako da su simulacije s istim uvjetima napravljene na još dvije mreže istog oblika i veličine, ali s većim brojem volumena. Grublja verzija se sastoji od 129600 volumena, a finija verzija od 583200 volumena. Rezultati ovih simulacija dani samo za pogonski uvjet 1.

Na slici dolje (Slika 32: Prikaz izolinija debljine filma nakon 1.75 s) izolinije pokazuju debljinu filma nakon 1.75 s. Vrijednosti maksimalne debljine filma su oko 270 mikrona. Ove vrijednosti su veće od onih dobivenih prvobitnom mrežom.

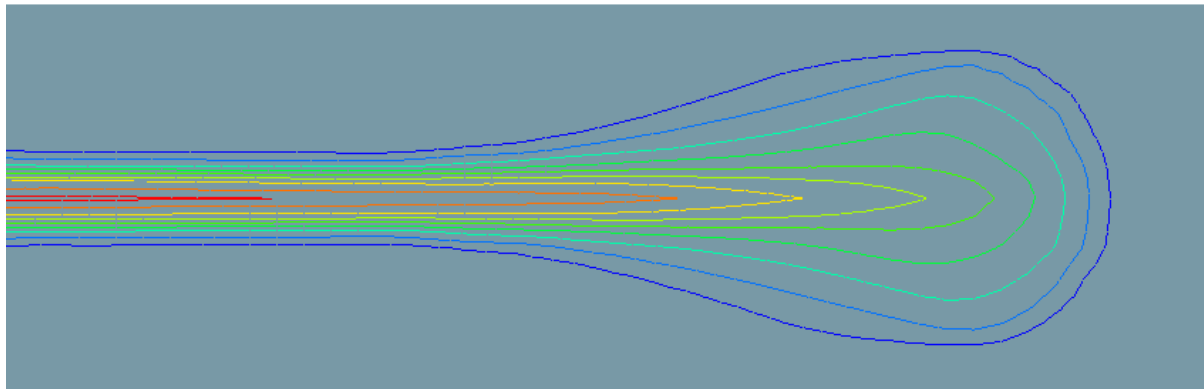


**Slika 31: Prikaz mreže sa 129600 volumena.**

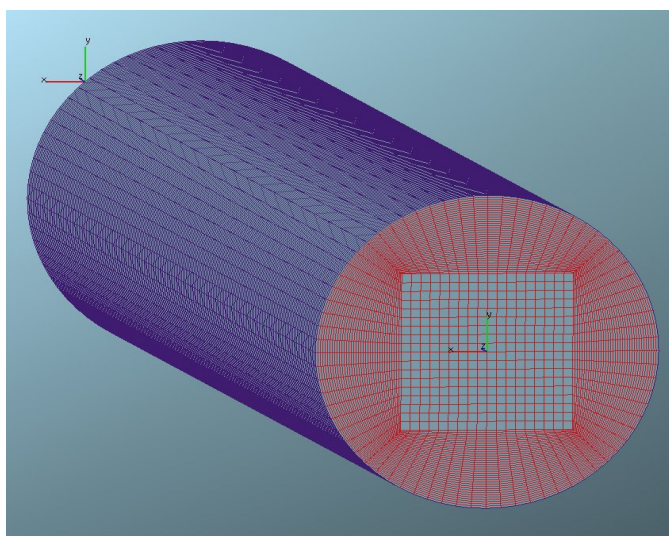


**Slika 32: Prikaz izolinija debljine filma nakon 1.75 s.**

Sljedeća slika (Slika 33: Prikaz izolinija debljine filma nakon 1.75 s) pokazuje izolinije debljine filma za mrežu od 583200 volumena. Ovo su rezultati nakon trajanja simulacije od 1.75 s. Maksimalna debljina filma iznosi oko 285 mikrona. Ovo nam je pokazalo da veličina volumena ima značajan utjecaj na stvaranje i razvoj filma.

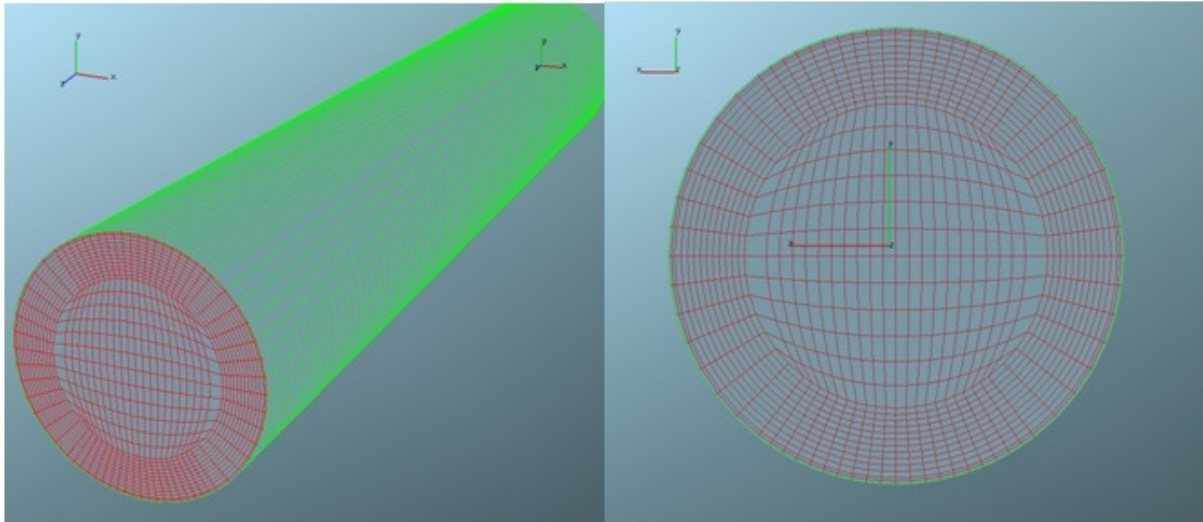


**Slika 33: Prikaz izolinija debljine filma nakon 1.75 s.**

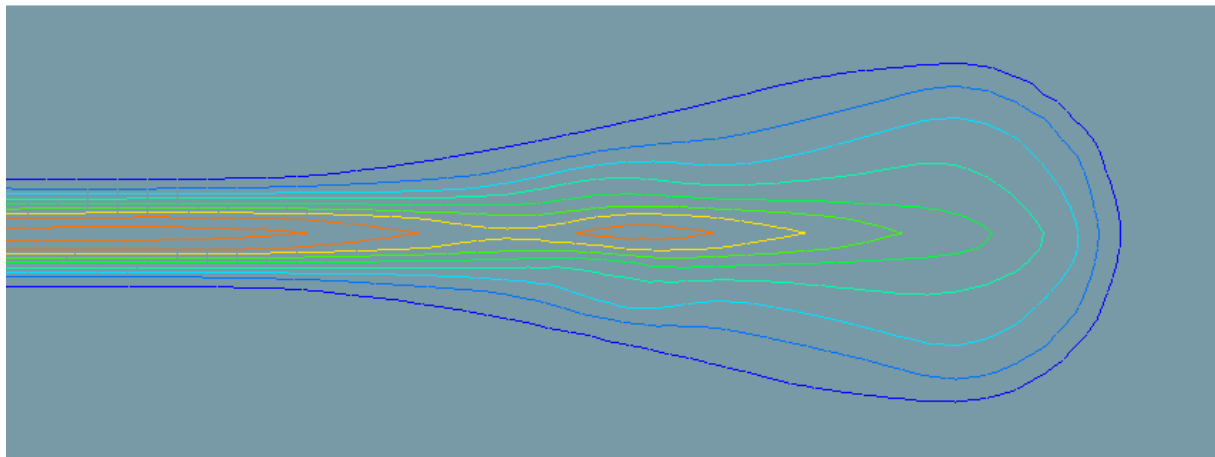


**Slika 34: Prikaz mreže sa 583200 volumena.**

U simulacije je uveden još jedan tip strukture mreže. Ta mreža je pokazana na slici 36 (Slika 36: Prikaz izolinija debljine filma za mrežu sa tipa cilindar-cilindar) dolje. Ovaj oblik mreže ima različite veličine volumena u različitim zonama. Tamo gdje se smatra da veličina može imati značajan utjecaj tamo su volumeni smanjeni dok na mjestima gdje se smatra da veličina nema značajan utjecaj volumeni su veći. Rezultati za ovu mrežu su dani za prvi pogonski uvjet. Mreža se sastoji od ukupno 96432 volumena.



Slika 35: Mreža sa strukturom tipa cilindar-cilindar.

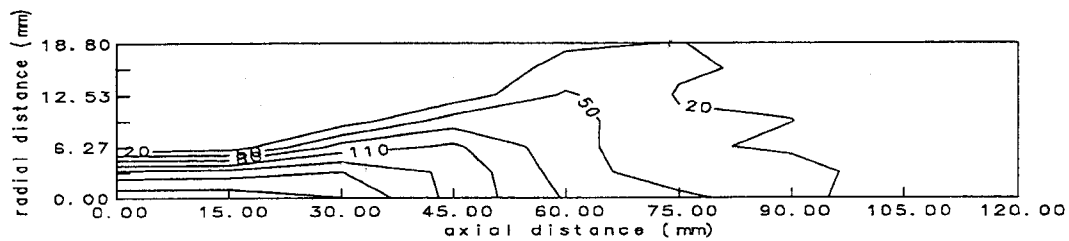


Slika 36: Prikaz izolinija debljine filma za mrežu sa tipa cilindar-cilindar.

#### 4.6. Usporedba rezultata simulacije sa dostupnim eksperimentalnim rezultatima

U sklopu projekta IDEA EFECT [11] napravljeni su eksperimenti na kojima je mjerena debljina filma prilikom ubrizgavanja spreja u cijev. Eksperimentalni rezultati debljine filma su dani iza sto ciklusa za svaki slučaj. Rezultati debljine filma su dani putem mapa osrednjene debljine filma. Te mape sadrže izolinije debljine filma i pokazuju debljinu filma po unutarnjoj površini cijevi. X os se naziva linija simetrije i pokazuje aksijalnu udaljenost. Y os je radijalna udaljenost od linije simetrije. Mape pokazuju područje cijevi 120 mm aksijalne duljine. Početak mape se nalazi 59 mm od izlaza cijevi. Korak između izolinija je 30 mikrona.

Mape svakog pogonskog uvjeta možemo vidjeti dolje. U tim podacima imamo pogonski uvjet koji odgovara pogonskom uvjetu broj 1. Na grafu dolje su prikazani eksperimentalni rezultati.



**Slika 37: Eksperimentalni rezultati za pogonski uvjet br. 1.**

Iz ovog grafa možemo očitati da je maksimalna debljina filma iznosi oko 230 mikrona. Takvi rezultati pokazuju da simulacija koja je pokazala najmanju dobivenu maksimalnu debljinu filma najbolje predstavlja realne procese. Simulacije kod kojih je korišten model "Bai-Gosman" interakcije stjenke pokazuju rezultate koji se najviše približavaju eksperimentalnim.

## 5. SIMULACIJA UBRIZGAVANJA SPREJA OTOPINE UREJE I VODE NA HORIZONTALNU STIJENKU

### 5.1. Uvod

Tehnologija koja najviše obećava u području smanjivanje NO<sub>x</sub> emisija iz ispušnih plinova je selektivna katalitička redukcija poznata po akronimu SCR. Ova tehnologija predstavlja učinkovitu tehniku smanjivanja NO<sub>x</sub> emisija kod dizelskih motora. Za ovu svrhu mora biti ugrađen reaktor u ispušnom sistemu motora u kojemu se odvijaju kemijske reakcije. UWS se ubacuje u obliku spreja u cijev s vrućim ispušnim plinovima nakon čega nastaje reducirajući spoj amonijak NH<sub>3</sub>. Nastajanje NH<sub>3</sub> se događa kroz tri procesa: isparavanje vode, termolize ureje i hidrolize izocijanične kiseline (HNCO). Kemijske jednadžbe ovih procesa su:

- $(\text{NH}_2)_2\text{CO}(\text{aq}) \rightarrow (\text{NH}_2)_2\text{CO}(\text{l}) + 6.9\text{H}_2\text{O}(\text{g})$
- $(\text{NH}_2)_2\text{CO}(\text{l}) \rightarrow \text{NH}_3(\text{g}) + \text{HNCO}(\text{g})$
- $\text{HNCO}(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow \text{NH}_3(\text{g}) + \text{CO}_2(\text{g})$

SCR metoda reduciranja NO<sub>x</sub>-a uz NH<sub>3</sub> kao konačan produkt reakcije daje čisti dušik N<sub>2</sub> i vodu H<sub>2</sub>O.

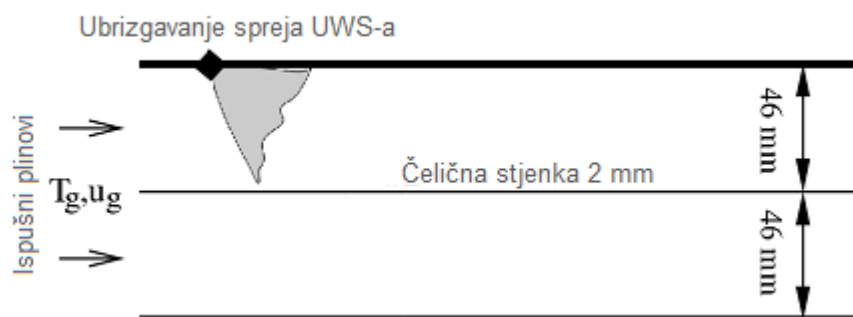
U reaktoru se UWS ubrizgava u vruće ispušne plinove. Ovo se radi uz pomoć standardne niskotlačne brizgaljke. Međutim UWS je u trenutku ubrizgavanja u tekućoj fazi tako da kapljice UWS-a udaraju u stjenku reaktora [20]. Tema razmatranja u ovom radu je upravo ta interakcija UWS spreja i stjenke. Da bi isparavanje započelo mora biti postignuta određena temperatura zasićenja. Ova temperatura je postignuta prelaskom topline s vrućih plinova. Isparavanje UWS kapljica u reaktoru predstavlja lokalni ponor toplinskog toka usred odvođenja toplinskog toka za toplinu isparavanja. Kapljice koje udare u stjenku mogu ostati na stjenci i tako sniziti temperaturu stjenke. Ponovnim udaranjem sljedeće kapljice na isto mjesto ohlade stjenku još više i još dulje se zadrže na njoj i tako konačno formiraju film tekućine na stjenci. Spojevi od kojih se sastoji UWS mogu biti jako korozivni za materijal reaktora i ispušnog sistema pa se mora spriječiti nastajanje filma tekućine.

Simulacijom će se utvrditi postoji li mogućnost da se u stvarnim uvjetima zbog navedenog efekta hlađenja stvori film tekućine koji može oštetiti materijal.

## 5.2. Postavke numeričke simulacije

### 5.2.1. Upotreba pojednostavljenog modela

Ova simulacija se temelji na promijeni temperature stjenke u koju udara sprej. Da bi smanjili potrebno vrijeme koje računalo treba da dođe do rješenja i kompleksnost modela možemo pojednostavniti naš simulacijski model. Kod realnih procesa SCR-a kanal kroz koji struje dimni plinovi je razdijeljen na dva dijela. Tako se samo u jedan dio kanala ubrizgava UWS. Stjenka na koju udara sprej se opet zagrijava sa druge strane kanala. Takav proces može se simulirati uz dva pojednostavljenja.



Slika 38: Shematski prikaz simuliranog SCR reaktora.

Prvo je model pojednostavljen tako da je umjesto cijele geometrije reaktora uzeta mreža kvadratskog oblika jednakih volumena koja predstavlja polovicu kanala u koji se ubrizgava UWS. U toj geometriji se odvijaju svi relevantni procesi. Donja površina geometrije je zapravo površina metalne ploče na kojoj se promatraju promjene temperature. Akumulacija topline i prolaz topline na metalnoj ploči se uzima u obzir i proračunava se preko "Fire-ovog" modela tankih stjenki [21][22][23]. Ovako se smanjuje potrebna snaga procesora i memorijski zahtjevi računala potrebnog za proračunavanje.

Druga stvar koja je pojednostavljena je ograničenje proračunavanja višefaznog toka 3D numeričke simulacije. Vrijeme od 200 s nije pogodno za višefazne tokove u numeričkim proračunavanjima. Da bi se riješio ovaj problem uveden je faktor ubrzanja  $f$ . Ovo pojednostavljenje je najviše vezano uz čvrstu stjenku koja se ponaša kao akumulator topline. Zbog te činjenice korištena je modificirana debljina stjenke ( $hf/f$ ) da bi se smanjila inercija kod hlađenja stjenke i tako se za simulacijsko vrijeme u kojem se stvore kvazistacionarni uvjeti može postaviti 4 s. Faktor ubrzanja iznosi  $f=150$  u ovim simulacijama.



### 5.2.2. Mreža

Mreža koja je korištena u ovim simulacijama je kvadarskog oblika i građena je od 63840 volumena. Ovo je prilično jednostavna mreža. Na toj mreži su označene površine ulaza, izlaza, gornja stjenka, donja stjenka i poprečne stjenke. Na donjoj površini su još definirane četiri površine izvučene iz pojedinih volumena koji su omeđeni donjom površinom. Na tim mjestima su bilježene temperature u svakom vremenskom koraku. Pomoću tih površina vrijednosti temperature su vađene iz simulacije i upotrijebljene za izradu grafova s rezultatima.

### 5.2.3. Vremenska diskretizacija

Zbog faktora ubrzanja vrijeme simulacije iznosi 4 s. Vremenski korak odabran za ovu simulaciju je 0.001 s. Ovaj vremenski korak se pokazao zadovoljavajućim za ovu simulaciju s obzirom na razvoj spreja, prijenosa topline kapljice i provodnosti topline metalne ploče.

### 5.2.4. Granični uvjeti

U ovom slučaju možemo razlikovati četiri procesa koja se odvijaju u simulacijskoj geometriji. Ovi procesi su strujanje plinova kroz kanal, ubrizgavanje UWS-a u obliku spreja, stvaranje tekućine filma na stjenci, 2D provođenje topline na donjoj površini.

Glavni granični uvjeti strujanja plinova kroz kanal su dani na ulazu i izlazu. Plinovi ulaze u kanal sa normalnom komponentom brzine koja iznosi 30 m/s i temperaturom od 390°C. Kinetička energija turbulencije je 10 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> i brzina discipijacije turbulencije je 519.615 m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>. Granični uvjeti na izlazu su dani samo u obliku statičkog tlaka na izlazu koji iznosi 100000 Pa. Poprečni zidovi i gornji zid imaju konstantnu temperaturu od 390°C također. Na donjem zidu odnosno površini koja predstavlja površinu metalne ploče zbog procesa isparavanja UWS kapljica i ostalih procesa vezanih uz dekompoziciju UWS-a imamo izmjenu topline na ploči. To znači da je donja ploča pod utjecajem hlađenja. Zbog toga trebamo definirati vanjski koeficijent prijenosa topline. Ovaj koeficijent ovdje iznosi 100 W/m<sup>2</sup>K.

Sprej UWS-a ulazi kroz sapnicu sa početnom brzinom od 18.2 m/s. Ukupna masa UWS-a koja je ubrizgana iznosi 0.1033 kg u dvama pogonskim uvjetima i 0.2066kg u jednom pogonskom uvjetu. Sapnica je pozicionirana na gornjem zidu 9 mm od ulaza.

Razvoj tekućine filma na stijenci je posljedica interakcije spreja i stjenke. U ovom slučaju film se stvara samo lokalno i ubrzo nestaje zbog isparavanja. Ovdje je film tekućine zanimljiv samo zbog prijenosa topline, pa je stoga dan koeficijent prolaza topline kroz stjenku koji iznosi 26 W/mK.

2D prijenos topline je predstavljen pomoću modela tankih stijenci. Taj model zahtjeva da se specificiraju materijali i debljina stjenke. Ovdje je materijal čelik, a debljina 2 mm. Također gustoća je  $7700\text{kg/m}^3$ , vodljivost topline je 26W/mK specifični toplinski koeficijent 25.6 J/kgK.

### 5.3. Pregled simulacija

Metalna ploča postavljena u sredini kao glavni promatrani objekt je simulirana uz pomoć modela tankih stijenci kao donja površina mreže. Upotrebom tog modela simulirani su svi relevantni procesi vezani za izmjenu topline na ploči. Kapljice UWS-a udaraju u stjenku i zbog interakcije sa stjenkom neke od kapljica ili dijelova kapljica ostaju na stijenci i započnu formaciju filma tekućine. Ovaj film ispari u nekom vremenu, ali također zbog isparavanja i ohladi stjenku. Tako hladna stjenka pogoduje daljnjem formiranju filma koji neće uspjeti ispariti prije nego što nove kapljice udare u njega. Stvaranja filma tekućine UWS-a u SCR reaktoru je nepoželjno jer smanjuje učinkovitost SCR reaktora i formiranje izocijanične kiseline može imati jaki korozivni efekt na materijal reaktora i materijal ispušnog sustava.

Simulacije procesa koji zahtijevaju jako dugo vremena nisu pogodni za numeričke simulacije 3D višefaznih tokova, stoga uvodimo faktor ubrzanja. Ovaj faktor iznosi  $f = 150$  i reducira vrijeme simulacije na 4 s. Ovaj faktor je modificiran kroz debljinu stjenke ( $hf/f$ ) da bi se smanjilo vrijeme potrebno za izmjenu topline. U simulacijama je ovo procesirano kroz postavke modela tankih stijenci.

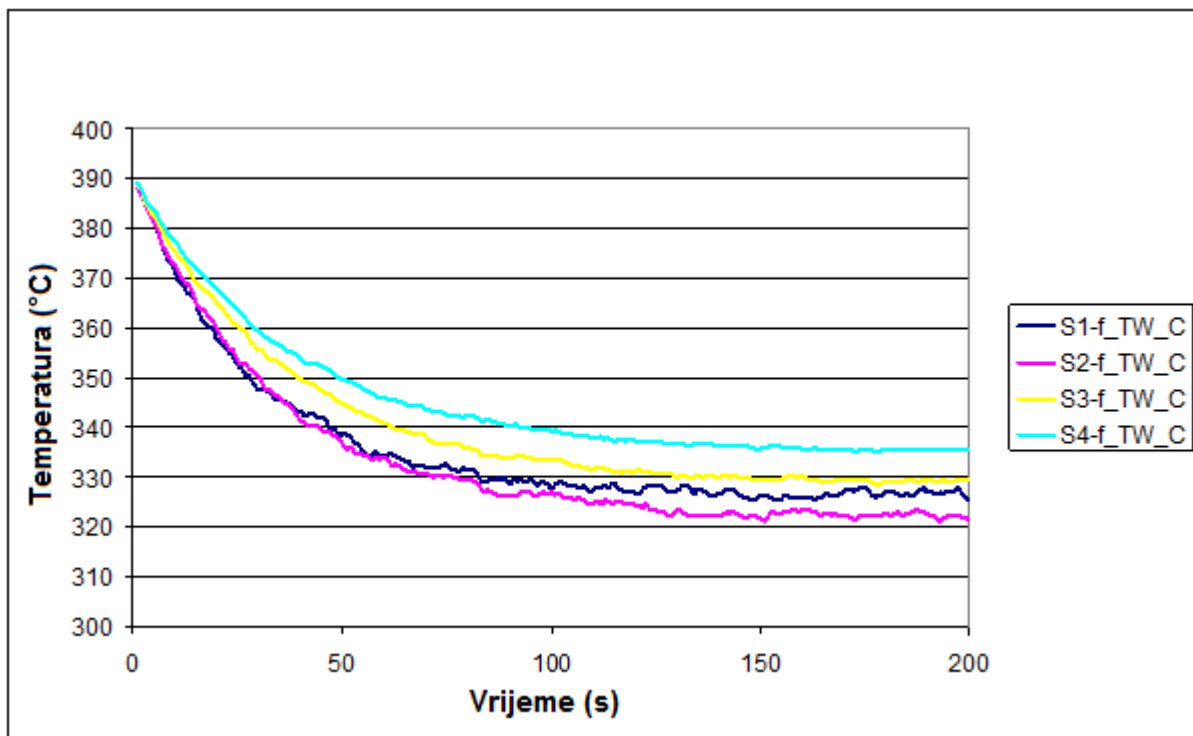
### 5.4. Rezultati simulacija za tri pogonska stanja

Postoje tri pogonska stanja s obzirom na varijacije ubrizgane mase i početne temperature ploče. Maseni protok kroz kanal i temperatura plinova ostaju konstantni u svim pogonskim uvjetima. Ubrizgana masa UWS-a je 1.86 kg/h za pogonsku uvjet 1 i 3, a 3.72 kg/h za pogonski uvjet broj 2. Temperatura metalne ploče je 663 K (390 °C) za pogonske uvjete 1 i 2, a 613 K (340 °C) za pogonski uvjet 3.

**Tabela 3: Tabela pogonskih uvjeta.**

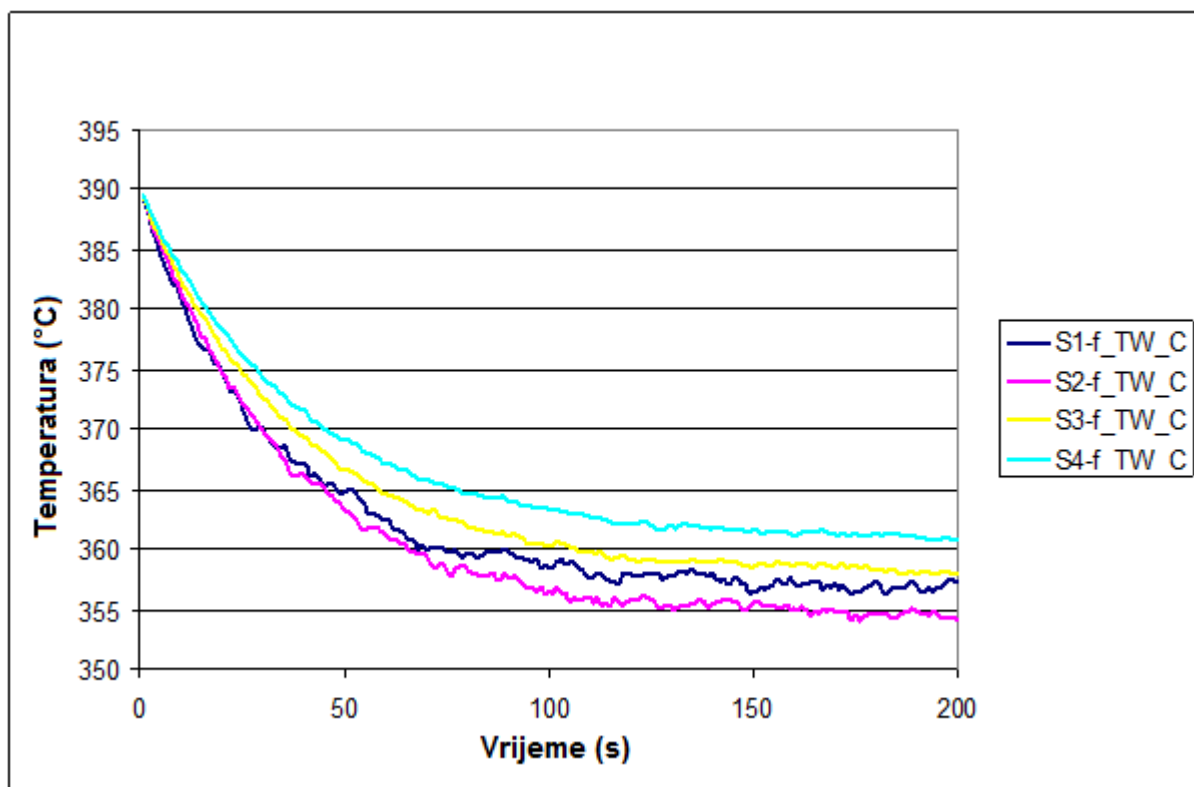
	Pogonski uvjet 1	Pogonski uvjet 2	Pogonski uvjet 3
Ubrizgana masa (kg/h)	1.86	3.72	1.86
Temperatura ploče (K)	663	663	613

Na prvom grafu (Slika 39) koji predstavlja rezultate za pogonski uvjet 1 imamo vrijednosti temperatura na četirima označenim površinama. Kao što se vidi na grafu površina S-2 ima najveći efekt hlađenja kao što je i očekivano jer je pod najvećim udarom spreja. Oscilacije krivulja se mogu objasniti nasumičnim udaranjem kapljica i ne stacionarnim efektom hlađenja. Nastanak filma se pojavljuje samo lokalno i njegovo trajanje iznosi u prosjeku desetak vremenskih koraka. Temperatura s početnih 390°C (663 K) pada i oko polovice vremena simulacije dođe na novu kvazistacionarnu vrijednost.

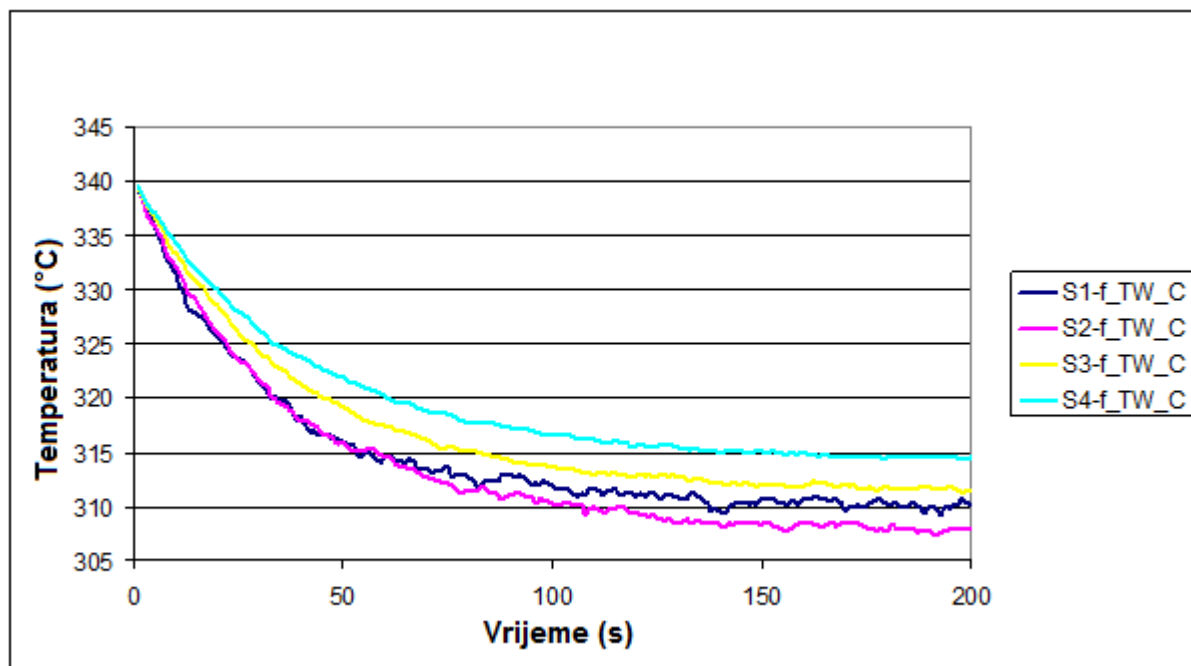
**Slika 39: Rezultati numeričke simulacije za pogonski uvjet br. 1.**

Numeričke simulacije za pogonske uvjete 2 i 3 također su prezentirane na ovaj način. Temperature dobivene na stjenci su veće od temperatura zasićenja i ni u jednom od ova tri pogonska uvjeta ne dolazi do stvaranja filma koji bi se zadržavao na stjenci. Toplinski tok iz

dimnih plinova je dostatan za potpuno isparavanje i termolizu kapljica UWS-a. Rezultate numeričkih simulacija za sljedeća dva pogonska uvjeta možemo vidjeti dolje.



Slika 40: Rezultati numeričke simulacije za pogonski uvjet br.2.

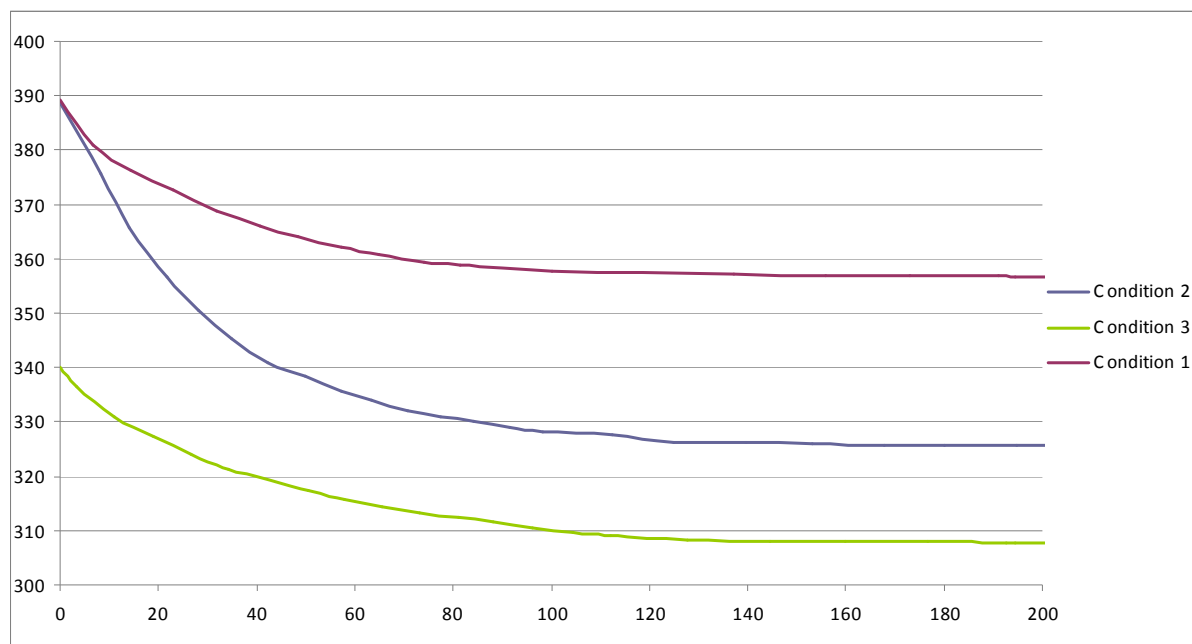


Slika 41: Rezultati numeričke simulacije za pogonski uvjet br.3.

### 5.5. Usporedba sa dostupnim eksperimentalnim podacima

Dostupni podaci za ovu simulaciju dolaze iz eksperimenta u kojemu je mjerena temperatura na sličnim mjestima kao u simulaciji. U tu svrhu je korištena relativno jednostavna tehnologija mjerenje temperature te nema nikakvih većih poteškoća vezanih uz mjernu opremu i prikupljanje podataka mjerenja. Korišteni su dobro poznati principi rada termoparova kao instrumenata pomoću kojih doznajemo temperaturu na osnovi razlike napona na njihovim krajevima.

Mjerenja su sakupljana preko sistema za prikupljanje podataka koji je spojen na računalo. Temperature su snimljene svakih 5 s. Na slikama dolje možemo vidjeti grafove eksperimentalnih rezultata za prvi termopar.



Slika 42: Eksperimentalni rezultati mjerenja temperatura u SCR katalizatoru.

Podaci pokazuju izmjerene vrijednosti za tri pogonska uvjeta koja odgovaraju simuliranim. Uspoređujući rezultate možemo vidjeti da simulacija jako dobro prati eksperiment i da su sva odstupanja zanemariva. Ovim smo pokazali da dobivene simulacije kvalitetno prikazuju realne fizikalne i kemijske procese u SCR katalizatoru.

## ZAKLJUČAK

Unesena pojednostavljena u simulacijske modele i upotreba empirijskih i polu empirijskih jednadžbi znači da se uvijek mora računati s mogućim odstupanjem rezultata od realnih procesa. Postoje metode koje se mogu koristiti za procjenu te greške. Da bi simulacije bile upotrebljive moraju davati rezultate koji su u zadanim granicama odstupanja od onih koji bi bili ostvareni u stvarnim uvjetima. Usporedba rezultata sa dostupnim eksperimentalnim je napravljena da bi se vidjelo koji modeli daju najbolje rezultate u danim okolnostima.

Simulacije interakcija spreja i stjenke u nagnutoj cijevi obrađene su na način da se uzimala projicirana mapa debljine filma na stjenci s obzirom na horizontalnu površinu filma. Tu moramo onda uzeti i mogućnost greške zbog kohezije tekućine i stjenke i malih vrijednosti debljine filma odnosno mogućnosti da površina filma nije potpuno horizontalna već prati konturu cijevi s jednim dijelom. Također u matematičkom modelu kako je već rečeno zanemareno je i postojanje valovite površine filma. Eksperimentalni podaci s kojima su na kraju uspoređene simulacije također imaju ove nedostatke međutim svejedno maksimalna debljina filma tekućine na stjenci u njima je bila manja od svih provedenih simulacija. Procijenjeno je da se to događa zbog toga što količina gibanja kapljice se ne prenosi na strujanje tekućine filma. U tom slučaju protok tekućine filma može biti manji nego što bi on stvarno bio u realnim procesima. Zbog toga ovo može biti tema daljnjih istraživanja. Također ima još nekoliko modela i njihovih parametara kod ovog slučaja koji mogu biti dalje istraživani. U slučaju Bai Gosman modela interakcije spreja i stjenke trebala bi biti provedena analiza njegovih parametara. Jedan od bitnijih parametara na koji treba obratiti pozornost je parametar s kojim je opisana hrapavost površine. Ovaj parametar treba biti detaljnije analiziran.

Simulacije koje su napravljene kako bi se analizirali procesi u ispušnom sustavu motora sa unutrašnjim izgaranjem rađene su na puno jednostavniji način. Kompleksnost kod tih simulacija najviše uvode kemijski procesi koji se pritom odvijaju. Međutim matematički modeli zasnovani na empirijskim izrazima skoro savršeno opisuju procese koji su tu simulirani. Također faktor ubrzanja koji je uveden u ovom slučaju da bi se simuliralo puno vremenski duži proces nego što je on u stvarnosti ne dovodi do značajnije greške modela. Ponašanje temperature u SCR slučaju pokazuje da su matematički modeli „Fire-a“ koji se tiču

energije jako dobri. Skoro savršeno preklapanje rezultat je postignuto kod ovog slučaja. To dokazuje da geometrija koja je odabrana za simuliranje eksperimenta je dostatna za ove simulacije i uzima u obzir sve bitne procese koji su vezani za temperaturno polje na središnjoj ploči.

## **PRILOZI**

I. DVD-R disc



## LITERATURA

- [1] Mehalec, I., Lulić, Z., Kozarec, D.: Motori s unutrašnjim izgaranjem, 2005.
- [2] Ferziger, J.H., Perić, M.: Computational methods for fluid dynamics, 2001.
- [3] Patankar, S.: Numerical heat transfer and fluid flow, 1980.
- [4] Vujanović, M. : Numerical modelling of multiphase flow in combustion of liquid fuel, 2010
- [5] Vujanović, M., Duić, N.: Numerička simulacija strujanja u kompleksnoj geometriji generatora pare na otpadnu toplinu, 2004.
- [6] Kuhnke, D.: Spray wall interaction modelling by dimensionless data analysis, 2004.
- [7] „Fire“ CFD workflow manual v.2008
- [8] Birkhold, F.: Selektive katalytische Reduktion von Stickoxiden in Kraftfahrzeugen: Untersuchung der Einspritzung von Harnstoffwasserlösung, 2007.
- [9] Birkhold, F.: Analysis of the Injection of Urea-water-solution for automotive SCR DeNO<sub>x</sub>-Systems: Modeling of Two-phase Flow and Spray/Wall-Interaction, 2006.
- [10] Kim, J.Y., Ryu, S.H., Ha, J.S.: Numerical prediction on the characteristics of spray-induced mixing and thermal decomposition of urea solution in SCR system, 2004.
- [11] „IDEA EFFECT FM7 project periodic reports“
- [12] Mann, M.: Simulation der wandfilmanlagerung des kraftstoffs im ausaugkanal, 1992.
- [13] Hanjalic, K., Popovac, M., Hadziabdic, M.: A robust near-wall elliptic relaxation eddy-viscosity turbulence model for CFD
- [14] Popovac, M., Hanjalic, K.: Compound Wall Treatment for RANS Computations of Complex Turbulent Flows, 2004.
- [15] Dukowicz, J.K.: A Particle-Fluid Numerical Model for Liquid Sprays, 1980.
- [16] Schadel, S.A., Hanratty, T.J.: Interpretation of atomisation rates of the liquid film in gas-liquid annular flow, 1989.
- [17] Mundo, C., Sommerfeld, M., Tropea, C.: Droplet-Wall Collisions: Experimental Studies of the Deformation and Breakup Proces, 1995.
- [18] Mundo, C., Sommerfeld, M., Tropea, C.: Experimental Studies of the Deposition and Splashing of Small Liquid Droplets Impinging on a Flat Surface, 1994.
- [19] Bai, C. and Gosman, A.D.: Development of Methodology for Spray Impingement Simulations, 1995.

- [20] Maanen, Meijer: AVL final report
- [21] Hirsch, C.: Numerical Computation of Internal and External Flows, 1988.
- [22] Tsai, C-F., Nixon, G.: Transient Temperature Distribution of a Multilayer Composite Wall with Effects of Internal Thermal Radiation and Conduction, 1986.
- [23] Galović, A. : Termodinamika II, 2010.
- [24] Beretta, C.: Implementation and validation of an improved wallfilm model for a commercial 3D-CFD program, 2005.
- [25] Kraut, B.: Strojarski priručnik