

# Analiza čestica nastalih izgaranjem goriva u motorima s unutrašnjim sagorijevanjem

---

Trstenjak, Sandra

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:149:892311>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-28**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE

SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Sandra Trstenjak

ANALIZA ČESTICANASTALIH IZGARANJEM GORIVA U MOTORIMA S  
UNUTRAŠNJIM SAGORIJEVANJEM

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada: Juraj Šipušić, prof.dr.sc.

Članovi ispitnog povjerenstva:

Jelena Macan, prof. dr. sc

Nevenka Vrbos, izv. prof. dr. sc.

Krunoslav Žižek, doc. dr. sc.

Zagreb, rujan 2018.

*Zahvaljujem svom mentoru prof. dr. sc. Juraju Šipušiću na uloženom trudu i ugodnim razgovorima pri izradi ovog rada.*

*Zahvaljujem se obitelji i prijateljima na podršci. Posebno hvala mami i tatikoj su uz mnogo odricanja, ljubavi i strpljenja bili uz mene tijekom cijelog trajanja studija.*

*Hvala Šejli i Nikoli na ljubavi i svim mudrim savjetima.*

*Hvala i Anamariji i Pauli.*

## Sažetak

U ovom je radu dan literaturni pregled procesa izgaranja u Otto i dizel motorima. Istaknuto je da termodinamički proračun daje sastav produkata izgaranja pri određenom tlaku i temperaturi. Ravnotežni sastav produkata izgaranja sastoji se od malih molekula kao CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO itd., te slobodnih radikala, primjerice ·OH. Ipak, zbog kratkog vremena miješanja smjese zraka i goriva, isparavanja goriva i zapaljenja, složene kinetike kemijskih reakcija, te konačne brzine procesa prijenosa tvari i energije u cilindru motora, dolazi do nepotpunog izgaranja i nastanka čvrstih lebdećih čestica. Sastav nastalih čvrstih čestica u području veličina od svega nekoliko mikrometara, te nastanak značajne količine čestica u području nanometarskih veličina, čini ih posebice štetnima po ljudsko zdravlje. Stoga je predložena tehnologija elektrostatskih filtera/taložnika za učinkovito pročišćavanje plinova izgaranja.

Ključne riječi: gorivo, izgaranje, motor, čvrste lebdeće čestice, elektrostatski filter

## **Abstract**

In this work, a literature survey of combustion processes occurring in Otto and diesel engines had been given. It is pointed out that thermodynamic calculations give final combustion products equilibrium composition at particular pressure and temperature. Equilibrium composition at high temperatures consists of small molecules like CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO... and free radicals like ·OH etc. However, due to the short time of air/fuel mixing, fuel evaporation and ignition, complex reaction kinetics and finite rates of heat and mass transfer processes in motor cylinder, gives rise to incomplete combustion and formation of particulate matter. Composition of particulate matter formed and its particle size distribution in micrometer and submicrometer range makes them particularly harmful for human health. Thus, an electrostatic precipitator technology is proposed for efficient flue gases cleaning.

Keywords: fuel, combustion, motor, particulate matter, electrostatic precipitator

## Sadržaj:

1. UVOD .....	1
2. OPĆI DIO .....	3
2.1. MOTORI S UNUTARNJIM IZGARANJEM .....	3
2.1.1. Otto motor .....	3
2.1.2. Diesel motor .....	4
2.2. SVOJSTVA GORIVA .....	5
2.2.1. Tekuća goriva .....	6
2.2.2. Plinovita goriva .....	7
2.3. Svojstva i raspodjela veličina čestica .....	8
3. PROCESI IZGARANJA .....	9
3.1. Kinetika izgaranja .....	9
3.2. Bilanca mase .....	10
3.3. Stehiometrijski odnosi u procesu izgaranja .....	10
3.4. Temperatura samozapaljenja .....	11
3.5. Vrijeme zapaljenja .....	13
3.6. Kompresijski omjer .....	14
3.7. Termodinamika izgaranja .....	14
3.7.1. Vrste izgaranja .....	15
3.7.1.1. Izgaranje u Otto motoru .....	15
3.7.1.2. Izgaranje u Diesel motoru .....	16
3.8. Produkti izgaranja .....	16
4. ANALIZA ČESTICA IZGARANJA .....	18
4.1. Formiranje čestica .....	18
4.2. Metode analize čestica .....	20
4.2.1. DMA metoda .....	20
4.2.2. ELPI sustav .....	21
4.2.3. Klasične metode analize .....	21
4.2.4. Rezultati analize čestica goriva .....	22
4.3. Utjecaj različitih faktora na raspodjelu veličine čestica .....	22
4.4. Obrada PM čestica .....	24
5. ZAKLJUČAK .....	26
6. LITERATURA .....	27
7. ŽIVOTOPIS .....	31

## 1. UVOD

Razvoj ljudskog društva zahtijeva sve veće količine energije, posebice u domeni transporta i prijevoza ljudi i dobara/proizvoda. Visoki standard razvijenih zemalja EU, Japana, Koreje i SAD, te brzorastuće ekonomije Kine, Indije, Brazila itd., dovode do povećanja broja motornih vozila, posebice osobnih vozila. Nadalje, smanjenje broja seoskog stanovništva, te povećanje broja gradskog stanovništva, uz povećanje broja i veličine višemilijunskih gradova dovodi do prometnih problema, ali i do smanjenja kvalitete zraka u gradovima. Pojave gustog smoga gotovo da su uobičajene uz nepovoljne meteorološke uvjete, te se oglašavaju alarmi za ograničenje kretanja stanovništva, smanjenje intenziteta rada industrije i ograničenja prometa motornih vozila. Veliki broj gradova ograničava ulazak automobila u gradska središta kako bi što više ljudi koristilo druge dostupne oblike javnog prijevoza ili zahtijeva da ta vozila ispunjavaju najviše ekološke standarde s obzirom na emisiju ispušnih plinova i čvrstih lebdećih čestica.

U ovom je radu prikazan literaturni pregled opširne tematike nastanka čvrstih lebdećih čestica (engl. *particulate matter*, *PM*) pri radu motora s unutrašnjim izgaranjem goriva, tj. benzinskih i dizel motora. Prije svega potrebno je napomenuti da moderno ljudsko društvo troši ogromne količine energije kako bi se osigurao i poboljšao standard življenja, te da se ugodnosti i prednosti modernog transporta kopnom, morem i zrakom nitko ne želi odreći. Iako toplinske energije na Zemlji ima puno, pogotovo toplinske energije koja zračenjem neprekidno dolazi sa Sunca na Zemlju (zbog rotacije Zemlje u 24-satnim ciklusima), dobivanje korisnog mehaničkog rada termodinamički je ograničeno u kružnom procesu (s radnim medijem) prema Carnotovom izrazu za koeficijent iskorištenja:  $\eta = 1 - T_1/T_2$ . Iz toga je izraza vidljivo da je teoretski maksimalni mogući koeficijent iskorištenja topline u mehanički rad u kružnom procesu moguće povećati smanjenjem temperature hladnijeg spremnika topline (okoliš) i povećanjem temperature toplijeg spremnika (najviše temperature radnog medija). Sniženje temperature hladnijeg spremnika, okoliša, je svakako nemoguće, te je praktično rješenje u visokoj temperaturi radnog medija. Visoku temperaturu radni medij postiže danas praktično uvijek korištenjem neobnovljivih fosilnih goriva (uz iznimku solarnih elektrana i geotermalne topline, ali samo za proizvodnju električne energije). Što se tiče relativno malih, distribuiranih i brojnih izvora mehaničke energije, praktično se radi o motorima s unutrašnjim izgaranjem goriva. Kapljevita goriva, benzinsko i dizel gorivo, dobivaju se preradom nafte, a u spremnik veličine 50 litara moguće je pohraniti gotovo 1500 MJ energije (toplinske energije

koja se oslobađa kemijskim reakcijama, gorenjem s kisikom iz zraka). Tehničko rješenje problema dobivanja mehaničke energije iz ugljikovodika (benzinskog i dizel goriva) postavlja još neka ograničenja, te se pri visokim temperaturama u cilindru motora javlja i oksidacija dušika, tj. ispušni plinovi sadrže i  $\text{NO}_x$ , a sumpor u gorivu dovodi do emisije  $\text{SO}_2$ . Nadalje mehanički dijelovi u relativnom gibanju se moraju podmazivati, a motori zahtijevaju dobro hlađenje jer pri visokim temperaturama dolazi do pada mehaničke čvrstoće materijala i pojave puzanja metala.

Nadalje, proces oksidacije goriva, reakcija molekula ugljikovodika s kisikom iz zraka zahtijeva određeno vrijeme i što bolju homogenost, odnosno izmiješanost goriva i oksidansa. Na molekulskoj razini i dalje se radi o molekulama koje se kaotično gibaju i sudaraju, te zapravo nemaju dovoljno vremena za postizanje termodinamičke ravnoteže. Primjerice, jedan kružni ciklus u četverotaktnom Otto motoru s unutrašnjim izgaranjem koji radi pri 3000 okretaja u minuti, traje svega 40 ms, jer u jednoj sekundi se dogodi 25 ciklusa: usisavanje-kompresija-ekspanzija-ispuhivanje (za svaki od ciklusa vratilo se okrene za  $180^\circ$ , te su potrebna dva okretaja vratila za kompletiranje jednog ciklusa). Nadalje, sam ciklus ekspanzije traje svega 10 ms. U tom vrlo kratkom vremenu potrebno je postići dobru izmiješanost goriva i zraka, te što potpunije izgaranje. Budući da motori rade u promjenjivom režimu rada (promjenjiv broj okretaja), uz relativno česta paljenja (tzv. motor je hladan), tijekom rada motora dolazi do nepotpunog izgaranja i emisije čvrstih čestica.

Rad motora u praksi mora riješiti i problem podmazivanja pri visokim temperaturama i tribološko odnosno tribokemijsko trošenje tarnih površina, što dovodi do daljnje emisije čvrstih čestica tijekom rada motora s unutrašnjim sagorijevanjem.

Na kraju rada, predložena je uporaba elektrofiltra za uspješno uklanjanje čvrstih čestica iz ispušnih plinova motora s unutrašnjim izgaranjem.



## 2. OPĆI DIO

### 2.1. MOTORI S UNUTARNJIM IZGARANJEM

Motori s unutarnjim izgaranjem su strojevi koji pretvaraju kemijsku energiju u mehanički rad izgaranjem goriva. [1] Djelatna tvar, radni medij, u jednom dijelu procesa je smjesa zraka i lakozapaljivog goriva, a u drugom smjesa zraka i plinova izgaranja. [2] Proces izgaranja odvija se u zatvorenom cilindru. Unutar cilindra je pokretni klip koji komprimira smjesu goriva i zraka koja zatim izgara i ekspanzijom daje rad. Dovod topline unutar cilindra predstavlja prednost ovih motora jer nisu potrebne velike površine za prijelaz topline od izvora do radnog medija.

Motori s unutrašnjim izgaranjem primjenjuju se najčešće kao pogonski motori automobila, brodova, zrakoplova, lokomotiva, traktora i sl. Takvi visokotlačni sustavi nose niz značajki koje znatno utječu na stvaranje onečišćenja. Jedan od najvećih proizvođača ugljikovog monoksida, neizgorenih ugljikovodika i dušikovih oksida su automobili. Ne iznenađuje, stoga, što je njihov dizajn sve više usmjeren prema smanjenju tih emisija.

Najčešće korišteni motori s unutarnjim izgaranjem danas su motori s kompresijskim paljenjem (Diesel) i motori s vanjskim izvorom zapaljenja smjese (Otto). [3]

#### 2.1.1. Otto motor

U Otto motore ubrajaju se konvencionalni motori s vanjskim zapaljenjem smjese gdje se izgaranje odvija izohorno kao širenje plamenog vala. Početak izgaranja kod takvih motora kontroliran je trenutkom preskakanja iskre na svjećici. Smanjenje emisija štetnih plinova, ugljikovog monoksida (CO) i neizgorenih ugljikovodika (HC) postiže se ugradnjom trokomponentnog katalizatora u ispušni sustav koji te plinove pretvara u ugljikov dioksid (CO<sub>2</sub>) i voden paru (H<sub>2</sub>O), a ujedno smanjuje i emisiju dušikovih oksida (NO<sub>x</sub>). Za ispravan rad katalizatora motor bi trebao raditi sa stehiometrijskom smjesom ( $\lambda=1$ ). Stehiometrijska smjesa je smjesa koja sadrži točno toliko kisika iz zraka koliko je potrebno za potpuno izgaranje goriva u cilindru (potrebno je približno 14.7 kg zraka za 1 kg goriva).[3] Stehiometrijski omjer goriva i zraka te njihova dobra izmiješanost osiguravaju ovakvim motorima nižu emisiju čestica nego kod Diesel motora. Promjena protoka zraka koji ulazi u cilindar omogućava, uz nepromijenjen omjer goriva i zraka, regulaciju snage motora ukoliko je omjer zraka i goriva nepromijenjen. To se vrši u usisnom sustavu, pomoću zaklopke.

Upotreba zaklopke rezultira povećanjem negativnog rada izmjene radnog medija, što za posljedicu ima smanjenje učinkovitosti motora. Zbog toga je glavni nedostatak takvih motora niska učinkovitost pri djelomičnom opterećenju.

### 2.1.2. Diesel motor

Diesel motor tipičan je predstavnik motora s kompresijskim paljenjem. Vrijednost kompresijskih omjera ovakvih motora kreće se do 24, što je mnogo više u odnosu na Otto motore. Izgaranje nastupa izobarno, ubrizgavanjem goriva u vrući zrak koji se zagrije uslijed kompresije u cilindru. Proces koji ograničava brzinu izgaranja, a nastupa od trenutka izlaska goriva iz brizgaljke do trenutka zapaljenja, uključuje formiranje kapljica goriva, njihovo sudaranje, raspadanje, isparavanje, te širenje para goriva. Zbog toga se smjesa može podijeliti na područje s malim udjelom goriva gdje se formiraju sitne kapljice goriva i na područje s velikim udjelom goriva gdje se formiraju veće kapljice goriva. U području s malim udjelom goriva dio zraka i sitnih kapljica goriva dobro se izmiješa i brzo izgara. Kapljice u području s velikim udjelom goriva ne stignu se dobro raspršiti, ispariti i izmiješati sa zrakom, nego izgore uz nedostatak kisika. Rezultat toga je nastanak čađe. Dio čađe može oksidirati uslijed visokih temperatura izgaranja u cilindru koje dosežu do 2700 K, ali to rezultira većom emisijom dušikovih oksida (NO<sub>x</sub>).[3]

Tablicom 1. prikazana je pojednostavljena usporedba navedena dva motora.

**Tablica 1.** Razlike Otto i Diesel motora [4]

Otto motor	Diesel motor
Izohorno izgaranje smjese zraka i goriva	Izobarno izgaranje gorive smjese
Paljenje smjese električnom iskrom	Paljenje smjese uštrcavanjem u vrući komprimirani zrak
Teži	Lakši
Veća potrošnja goriva	Manja potrošnja goriva
Hlapljivije gorivo, veći rizik pri rukovanju	Manje hlapivo gorivo, manji rizik pri rukovanju
Koristi rasplinjač za pripremu određene količine gorive smjese miješanjem zraka s gorivom i potom ju raspršuje u cilindar	Koristi se injektor za raspršivanje goriva u fine sitne kapljive koje izgara u kontaktu s vrućim komprimiranim zrakom
Tlak na kraju kompresije je oko 10 bara	Tlak na kraju kompresije je oko 35 bara

## 2.2. SVOJSTVA GORIVA

Motori s unutrašnjim izgaranjem klipni su motori u kojima se izgaranje goriva i prijelaz topline radnog medija u rad odvija neposredno unutar cilindra. [2] Za pogon se najčešće koriste tekuća goriva, ali mogu se primijeniti i plinovita. Kvaliteta goriva, uz široke temperaturne granice procesa, diktira stupanj termodinamičkog iskorištenja.

Najvažnije karakteristike goriva su: kemijski sastav, toplinska vrijednost, temperatura izgaranja i radni uvjeti pri procesu zagrijavanja.[5] Osnovne gorive komponente čine ugljik i vodik u različitim omjerima, te sumpor. Uz navedeno, u sastav goriva ulaze još i dušik, pepeo i voda. [5]

Udjeli pojedinih sastojaka, uključujući vodu (W) i pepeo (A), prikazani su u  $\text{kg/kg}_{\text{GORIVA}}$  jednadžbama (2.1) i (2.2) [6]:

$$\text{za tekuća goriva: } C + H + O + N + S + W + A = 1 \quad (2.1)$$

$$\text{za plinovita goriva: } CH_4 + CO + H_2 + C_mH_n + H_2S + O_2 + CO_2 + N_2 = 1 \quad (2.2)$$

gdje su m i n broj C, odnosno H atoma ugljikovodika alkanskog niza.

Sastojci goriva u procesu izgaranja prolaze energetske transformacije u kojoj nastaju dimni plinovi koji tako postaju nositelji toplinske energije.

### *Toplinska vrijednost goriva*

Toplinska vrijednost goriva predstavlja količinu topline koja se razvija pri potpunom izgaranju jedinice količine goriva, jednog kilograma krutog, odnosno tekućeg ili jednog metra kubnog plinovitog goriva. Definirane su donja ( $H_d$ ) i gornja ( $H_g$ ) toplinska vrijednost gorivakoje se razlikuju za vrijednost latentne topline kondenzacije vodene pare nastale izgaranjem goriva. Donja toplinska vrijednost goriva u sebi ne sadrži latentnu toplinu vodene pare jer se voda nalazi u obliku vodene pare, dok je u gornjoj toplinskoj vrijednosti ta vodena para kondenzirala i prešla u kapljevitog agregatno stanje - iskorištena je latentna toplina vodene pare. [6]

### *Oktanski broj*

Oktanski brojje mjera otpornosti benzina samozapaljenju i jednoličnosti koncentričnog širenja fronte plamena u radnom prostoru motora. Ovisi o sastavu goriva, a može se povećati

dodatkom aditiva. Vrijednosti se kreću od 0 do 100, a određuju se izgaranjem smjese izooktana i n-heptana, pri čemu oktanski broj odgovara udjelu izooktana. Tako n-heptan koji vrlo lako detonira ima vrijednost 0, dok izooktan koji ne detonira ima vrijednost 100.[7] Sklonost detonaciji raste povećanjem duljine lanca ugljikovodika koji se sastoji od  $\text{CH}_2$  grupa, a smanjuje se povećanjem broja  $\text{CH}_3$  grupa. [5]

### *Cetanski broj*

Cetanski broj važna je karakteristika dizel goriva, a izražava koliko će se brzo gorivo zapaliti. Vrijednosti se kreću od 0 do 100, a dogovoreno je da ugljikovodik n-cetan (heksadekan) ima cetanski broj 100, a ugljikovodik  $\alpha$ -metilnaftalancetanski broj 0.

Povećanje cetanskog broja smanjuje vrijeme dostizanja samozapaljenja pri određenoj brzini motora, potrošnju goriva, buku koja se stvara tijekom rada motora te emisiju ispušnih plinova. [7]

### **2.2.1. Tekuća goriva**

Najvažnija sirovina za dobivanje tekućih goriva je nafta, gusta uljasta tekućina sastavljena od različitih ugljikovodika (parafinskih, olefinskih, naftenskih i aromatskih) i organskih spojeva koji sadrže kisik, dušik i sumpor. Udjeli navedenih spojeva u nafti određuju njena svojstva. Sve osim ugljikovodika štetno je i nastoji se odstraniti do određene mjere pri preradi nafte. Ovisno o temperaturi vrenja, nafta se razlaže na različite frakcije, a neke od njih su motorni benzin i dizelsko gorivo.[8]

### *Motorni benzin*

Benzinsko gorivo je jedno od najvažnijih naftnih proizvoda. Definirano je kao gorivo dobiveno destilacijom nafte i rabi se za pogon motora sunutarjim izgaranjem koji zapaljenje smjese ostvaruju iskrom koju proizvodi svjećica (Otto motor). Većina putničkih automobila diljem planeta koristi benzin kao pogonsko gorivo, te je potreba za njim vezana direktno za rast automobilske industrije. [7]

Motorni benzini znatno se razlikuju po svom sastavu, a jedno od mjerila određivanja njihove kvalitete je oktanski broj. Što benzin ima veći oktanski broj veća mu je otpornost prema detonantnom izgaranju i može se koristiti u motorima s većim kompresijskim omjerom.

### *Diesel gorivo*

Dieselgorivo koristi se za pogon motora koji radi Diesellovim ciklusom. Dizelski motor karakterističan je po tome što nema svjećice, nego se gorivo nakon ubrizgavanja u cilindar samozapaljuje. Točka samozapaljenja dizelskog goriva iznosi oko 350 °C tako da se ono upali bez poteškoća (temperatura komprimiranog zraka je od 500 do 700 °C).[9] Struktura sastava dizelskog goriva prema [1, 9] ista je kao kod motornog benzina (osnova, dodatne komponente, aditivi), a poželjno je da sirova nafta iz koje se dobiva dizelsko gorivo sadrži parafinske te naftenske ugljikovodike. Dizelsko gorivo koristi se za pogon kamiona, autobusa, traktora, poljoprivrednih strojeva, putničkih automobila, brodova, električnih generatora, diesel električnih lokomotiva.

### **2.2.2. Plinovita goriva**

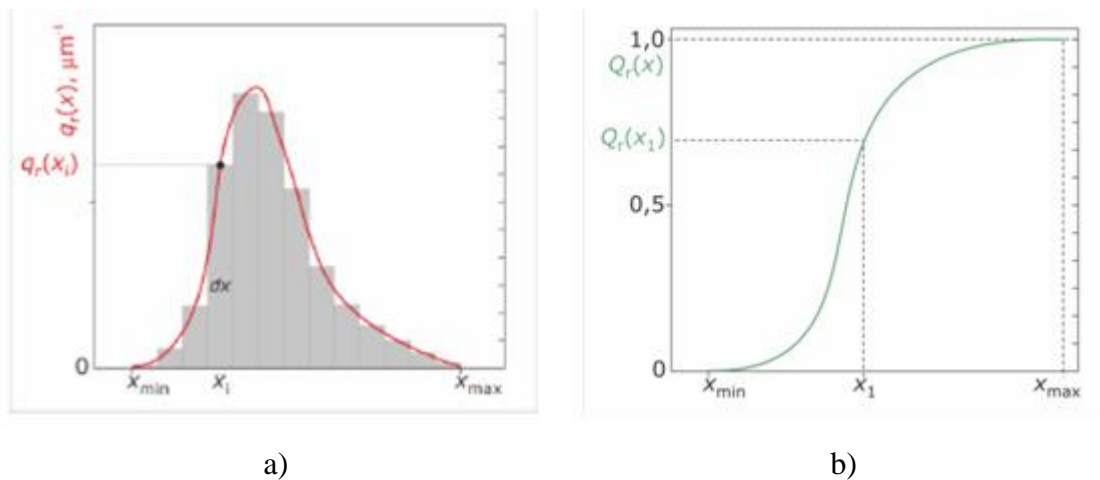
Zemni plin najvažnije je plinsko gorivo. Smjesa je lakih ugljikovodika, vode i drugih gorivih i negorivih plinova ovisno o vrsti i porijeklu. Sastav varira u zavisnosti od nalazišta u širokim granicama. Tu se ubrajaju metan (CH<sub>4</sub>), etan (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), propan (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), butan (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), sumporovodik (H<sub>2</sub>S), ugljikov monoksid (CO), ugljik dioksid (CO<sub>2</sub>) i dr.

### *Ukapljeni naftni plin (UNP/LPG)*

UNP ili ukapljeni naftni plin je mješavina ukapljenih ugljikovodika koji su u normalnom stanju plinovi, a pri povećanju tlaka prelaze u tekuće stanje. Dobiva se rafiniranjem sirove nafte, odnosno izdvajanjem propana i butana iz prirodnog plina. U pravilu se sastoji od 75% butana koji se ukapljuje pri tlaku od 2,2 bar i 25% propana koji se ukapljuje pri znatno višem tlaku, 22 bar. [10] Nalazi se u dva stanja, tekućem i plinovitom, a ukapljivanjem mu se volumen smanjuje do 270 puta. [11] Teži je od zraka, bez boje i mirisa, a dodaju se, kao i kod tekućih goriva, aditivi koji mu daju karakterističan i izražen miris (za detekciju eventualnog curenja). Nije topljiv u vodi, nije otrovan, no prevelik udio u zraku može biti štetan, te mu je područje eksplozivnosti u niskim granicama. Smatra se ekološki čistim energentom jer izgaranjem nastaju samo CO<sub>2</sub> i vodena para, bez dima, sumpornih spojeva i krutih čestica.

### 2.3. Svojstva i raspodjela veličina čestica

Jedno od važnijih fizikalnih svojstava čestica njihova je veličina. Određivanje veličine i raspodjele veličine čestica ključno je pri utvrđivanju ishoda procesa. Raspodjela veličina predstavlja odgovarajuće udjele čestica ( $Q_r$ , gdje  $r$  označava vrstu raspodjele, npr.  $r = 0$  označava brojčanu, dok recimo  $r = 3$  označava masenu odnosno volumnu raspodjelu) neke veličine, a može se prikazati histogramom (slika 1a) ili kontinuiranom krivuljom (slika 1b). [12] Karakteristične veličine kod analize krivulje raspodjele su: širina raspodjele i najučestalija veličina.



**Slika 1.** Prikaz raspodjele veličina a) funkcijom gustoće raspodjele i b) kumulativnom funkcijom raspodjele

### 3. PROCESI IZGARANJA

Gorenje je složen fizikalno-kemijski proces u kojem se odigravaju brze kemijske reakcije, praćen oslobađanjem velike količine topline. [5]

Kemijski proces izgaranja može se definirati kao oksidacijski proces koji može biti egzoterman (razmjenjuje toplinu s predajući mu je) ili endoterman (razmjenjuje toplinu s okolinom uzimajući mu je). Proces izgaranja promatran u ovom radu odnosi se na pretvorbu ugljikovodičnog goriva (koje varira od čistog vodika pa do čistog ugljika) u ugljični dioksid ( $\text{CO}_2$ ) i vodu ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Takav proces odvija se pri potpunom izgaranju, a dimni plinovi sadržavaju molekule  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$  i  $\text{N}_2$ . S druge strane, nepotpunim izgaranjem ugljikovodično se gorivo ne pretvara samo u navedene produkte već dimni plinovi sadržavaju i molekule  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  i  $\text{CH}_4$ . Uobičajeni oksidans korišten pri izgaranju je zrak jer je dostupan u velikim količinama, no u posebnim okolnostima i drugi oksidansi mogu poslužiti, kao, na primjer, kod raketnih motora. [13]

#### 3.1. Kinetika izgaranja

Za proučavanje procesa izgaranja od velikog je značaja poznavanje utjecaja različitih faktora o kojima ovisi ravnotežni sastav smjesa. Od posebnog je interesa ravnoteža kemijskih reakcija na visokim temperaturama na kojima se produkti izgaranja ponašaju kao idealni plinovi. Mehanizam izgaranja ugljikovodika još je složeniji jer se uz reakcije na višim temperaturama odigravaju reakcije termičkog razlaganja što povećava broj mogućih intermedijarnih produkata.

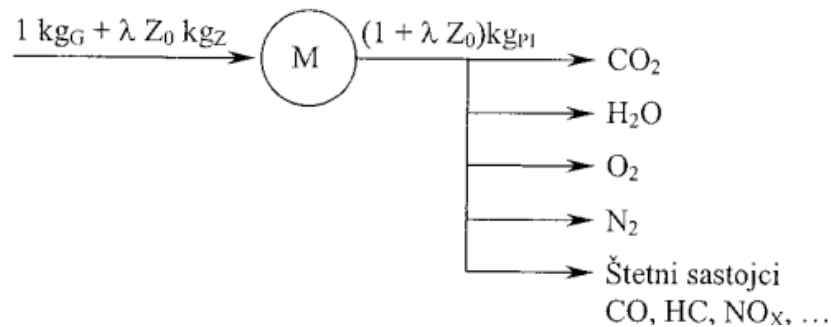
Provede li se proces izgaranja u zadanim okolnostima do kraja, može se reći da, ako je zadovoljen uvjet kemijske ravnoteže, nakon protjecanja reakcije postoje produkti potpunog izgaranja -  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$  i  $\text{N}_2$ , te komponente koje nisu sudjelovale u izgaranju.

Pri potpunom izgaranju svi gorivi sastojci goriva potpuno oksidiraju, dok se pri smanjenoj količini zraka (npr. zbog konstrukcije ložišta - mrtvi prostori) javlja nepotpuno izgaranje koje, također, uzrokuje energetske gubitke. Cijepanje višeatomnih molekula  $\text{CO}_2$  i  $\text{H}_2$  na temperaturama višim od  $1500\text{ }^\circ\text{C}$  izaziva i stvaranje slobodnih radikala, pa se tako plin izgaranja više ne sastoji samo od  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{N}_2$  i  $\text{O}_2$  nego i od  $\text{CO}$ ,  $\text{CN}$ ,  $\text{HO}\cdot$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}$  i  $\text{N}$  te ostalih sumpornih spojeva. Entalpija tih disociranih plinova pri istoj temperaturi veća je nego kod nedisociranih plinova, a to uzrokuje smanjenje adijabatske temperature izgaranja. [13]

Zbog velike složenosti procesa izgaranja ugljikovodika njihov mehanizam i kinetika zahtjevni su za proučavanje pa je samim time i ponašanje u navedenom procesu izgaranja goriva predmet brojnih istraživanja.

### 3.2. Bilanca mase

U motor ulaze gorivo i zrak potrebni za izgaranje, a izlaze produkti izgaranja kako je shematski prikazano na slici 2.



**Slika 2.** Bilanca mase motora s unutarnjim izgaranjem [14]

Pri određivanju potrošnje goriva koristi se specifična efektivna potrošnja goriva izražena jednadžbom (3.1) [15]:

$$g_e = \frac{G}{P_e} \quad (3.1)$$

gdje je:

- $g_e$  - specifična efektivna potrošnja goriva, kg/kWh
- $G$  - masa goriva, kg
- $P_e$  - efektivna snaga motora, kWh

### 3.3. Stehiometrijski odnosi u procesu izgaranja

Za izgaranje goriva potreban je zrak, a za izgaranje u cilindru motora potrebna je odgovarajuća smjesa goriva i zraka. Količina zraka s kojom bi u idealnim uvjetima kilogram goriva potpuno izgorio, naziva se stehiometrijskom količinom zraka.

$Z_0$  - stehiometrijska količina zraka,  $\frac{\text{kg Z}}{\text{kg G}}$



Stehiometrijska količina zraka za benzin i Diesel gorivo približno iznosi:

$$Z_0 \approx 14,7 \frac{\text{kg } Z}{\text{kg } G}$$

Kako je poznato da motor ne radi sa stehiometrijskom količinom zraka, definira se faktor zraka,  $\lambda$ . On predstavlja omjer stvarne količine zraka kojom izgara gorivo u motoru ( $Z$ ) i stehiometrijske količine zraka, a prikazan je jednačinom (3.2) [15]:

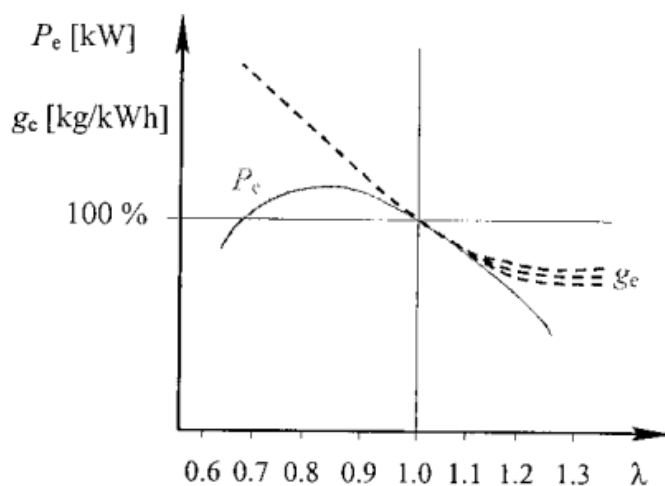
$$\lambda = \frac{Z}{Z_0} \quad (3.2)$$

$\lambda < 1$   $Z < Z_0$ , bogata smjesa (manjak zraka, višak goriva)

$\lambda = 1$   $Z = Z_0$ , stehiometrijska smjesa

$\lambda > 1$   $Z > Z_0$ , siromašna smjesa (višak zraka, manjak goriva)

Što je gorivo *teže*, odnosno što je manji omjer molova vodika po molu ugljika, povećava se faktor zraka. Tako na primjer faktor zraka za benzin ( $\sim\text{C}_8\text{H}_{18}$ ) iznosi nešto manje od 15, dok je za čisti ugljik on 11,5. [16]

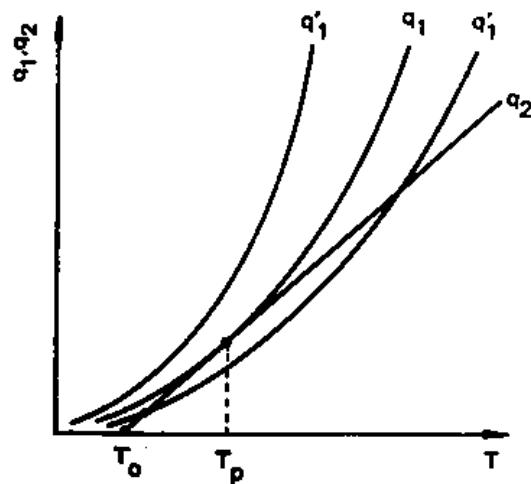


**Slika 3.** Utjecaj faktora zraka  $\lambda$  na efektivnu snagu  $P_e$  i specifičnu potrošnju goriva  $g_e$  [14]

### 3.4. Temperatura samozapaljenja

Jedna od bitnih tehničkih karakteristika goriva je temperatura njegova paljenja. To je ona temperatura kod koje počinje lančani proces izgaranja, odnosno, brza oksidacija uz intenzivno oslobađanje topline. Za ugljikovodična goriva temperatura samozapaljenja je ona

temperatura na kojoj gorivo ima dovoljno unutarnje energije da prekine kemijske veze u strukturi ugljik – vodik i da oksidira u ugljični dioksid i vodenu paru. Proces oslobađanja topline u sustavu praćen je odvođenjem topline, pa zbog toga nije moguće jednoliko održavanje temperature u cijelom reakcijskom prostoru. Uz razlike u temperaturi unutar komore izgaranja javljaju se i razlike u brzini odvijanja reakcija od točke do točke, što dovodi do razlike u koncentraciji reaktanata. [5]



**Slika 4.** Grafički prikaz kritičnih parametara samozapaljenja[17]

Na slici 4. prikazana je ovisnost oslobađanja topline ( $q_1$ ) i brzina odvođenja topline ( $q_2$ ) od temperature. Krivulje  $q_1'$  i  $q_1''$  odgovaraju različitim tlakovima smjese u reaktoru.  $T_0$  predstavlja temperaturu stijenke. Sjecište krivulja  $q_1$  i  $q_2$  odgovara temperaturi samopaljenja,  $T_p$ . Pritom je zadovoljen uvjet da je brzina oslobađanja topline jednaka brzini odvođenja prikazan jednadžbom (3.3) [5]:

$$q_1 = q_2 \quad (3.3)$$

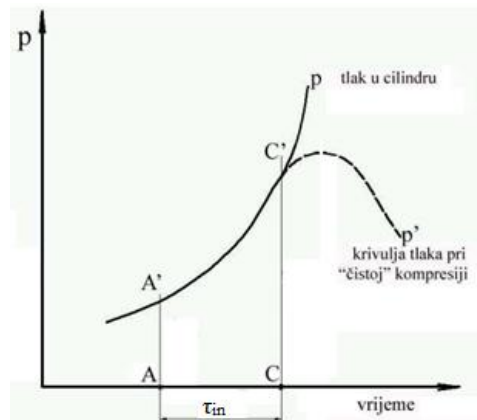
Stvarna temperatura izgaranja ovisi o nizu faktora, a prije svega o vrsti goriva, njegovoj toplinskoj vrijednosti, odnosu zrak-gorivo, kvaliteti miješanja smjese goriva i zraka. Za različite vrste goriva i temperature paljenja se razlikuju. [5]

O temperaturi izgaranja ovisi sastav produkata izgaranja. [18]

Temperatura ispušnih plinova Ottova motora pri srednjem broju okretaja i djelomičnom opterećenju iznosi od 550 do 650 °C, pri punom opterećenju do 850 °C, a Dieselova motora od 250 do 550 °C, odnosno do 750 °C. [19]

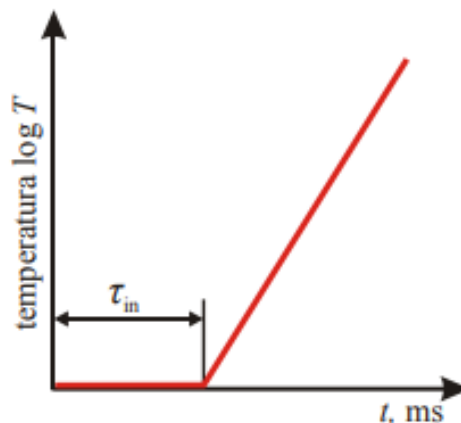
### 3.5. Vrijeme zapaljenja

Razlika temperatura samopaljenja ( $T_P$ ) i temperature paljenja ( $T_0$ ) predstavlja zagrijavanje smjese koje prethodi samozapaljenju. Vrijeme koje protekne dok se smjesa zagrije naziva se vrijeme zakašnjenja paljenja ili vrijeme inicijacije samozapaljenja [5, 20]. Prema definiciji to je vremenski interval između trenutaka početka ubrizgavanja goriva (A) i početka efektivnog oslobađanja topline (C), odnosno, na liniji tlaka između točaka (A') i (C') [21], kako je prikazano na slici 5.



Slika 5. Grafički prikaz zakašnjenja paljenja [22]

Na slici 6. je kvalitativno prikazana vremenska promjena temperature tijekom lančanih kemijskih reakcija u smjesi ugljikovodika i zraka. Tijekom vremena zakašnjenja paljenja ( $\tau_{in}$ ) eksponencijalno raste koncentracija radikala, a porast temperature je neznan zbog male količine goriva koja je obuhvaćena reakcijama te malog iznosa energije koja se u toj fazi procesa oslobađa [23]. Brzina odvijanja kemijskih reakcija u kojima nastaju slobodni radikali značajno ovisi o temperaturi.



Slika 6. Pojednostavljeni prikaz ponašanja lančanih reakcija u adijabatskom sustavu [23]

U eksperimentalnim istraživanjima ovisnosti vremena zakašnjenja paljenja o temperaturi i tlaku smjese, provedenim s različitim smjesama ugljikovodika i zraka, utvrđeno je da se promjena vremena inicijacije samozapaljenja s tlakom i temperaturom može opisati Arrheniusovim izrazom [20]:

$$\tau_{in} = A \cdot p^{-n} \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad (3.4)$$

gdje su:

$\tau_{in}$	-	vrijeme zakašnjenja paljenja, ms
$A$	-	faktor frekvencije, ms·bar <sup>n</sup>
$p$	-	tlak smjese, bar
$n$	-	eksponent tlaka
$T$	-	temperatura smjese, K
$B$	-	faktor aktivacijske energije, K

### 3.6. Kompresijski omjer

Važan parametar motora je kompresijski omjer, bezveličinski broj koji predstavlja omjer obujma cilindra kada se klip nalazi u donjoj mrtvoj točki (DMT) i obujma kada se klip nalazi u gornjoj mrtvoj točki (GMT). Kompresijski omjer važan je pri razmatranju procesa izgaranja, odnosno stupnju korisnosti motora te se teži što većem broju. Na veličinu omjera utječe vrsta smjese koja se nalazi u cilindru tijekom kompresije. [24] Kako se kod Otto motora tijekom kompresije zagrijava smjesa zraka i goriva, a kod Diesel motora se gorivo uštrcava u vrući komprimirani zrak, razlikuju se i kompresijski omjeri ova dva motora. Za benzinski motor vrijednosti se kreću od 8 do 12, a za dizel od 14 do 25. Vrijednosti kompresijskog omjera benzinskog motora niže su kako bi se izbjeglo detonantno izgaranje. [15]

### 3.7. Termodinamika izgaranja

Po definiciji termodinamika je primjenljiva na sve makroskopske promjene stanja s tim što se ravnotežne promjene stanja opisuju s tlakom, volumenom, temperaturom i sastavom (pri djelomičnoj ili potpunoj provedbi kemijske reakcije među komponentama

gorive smjese). U procesu izgaranja moraju se zadovoljiti dva osnovna zakona termodinamike i zakon o očuvanju mase. [13] Prvi zakon termodinamike govori o povezanosti kemijske reakcije s pretvorbom energije, odnosno da zbog kemijske reakcije goriva i zraka nastaju dimni plinovi uz izmjenu energije s okolišem u obliku obavljenog rada i izmijenjene topline. Termodinamička savršenost pretvorbe energije iz jednog oblika u drugi ocjenjuje se drugim zakonom termodinamike. Njime se tako može doći do informacija o ireverzibilnosti izgaranja u motorima s unutarnjim izgaranjem koje za sobom povlači velike energetske gubitke. Zakon o očuvanju mase koristi se za određivanje količine nastalih dimnih plinova iz zadane količine goriva i potrebne količine zraka za izgaranje.

### **3.7.1. Vrste izgaranja**

U motorima s unutarnjim izgaranjem kemijska neravnoteža unutar gorive smjese dovodi kemijskim procesom izgaranja do mehaničke neravnoteže između radnog medija i stapa, a samim time i do dobivanja korisnog rada. [13]

Samo se izgaranje može odvijati u različitim okolnostima i na različite načine, ovisno o tipu motora.

#### **3.7.1.1. Izgaranje u Otto motoru**

Goriva se smjesa formira tako da gorivo izohorno ( $V = \text{konst.}$ ) isparava u zraku još tijekom takta kompresije, a zatim se ta približno homogena smjesa zapaljuje iskrom iz svjećice uz faktor zraka  $\lambda \approx 1$ . U ovom slučaju kompresijski se omjer kreće oko 7 – 8. Preduvjet tom procesu je da se smjesa zraka i isparenog goriva u relativno niskom rasponu masenih omjera nalazi između elektroda svjećice i da se može zapaliti iskrom. Energija predana iskrom uzrokuje lokalni porast temperature smjese od nekoliko tisuća stupnjeva Kelvina i tako omogućuje porast temperature isparenoga goriva, koje postiže svoju temperaturu samozapaljenja. Točka isparavanja goriva pri kompresiji je oko 200 °C, a kako je temperatura samozapaljenja goriva za Ottomotore oko 220 °C, sam proces dovodi do djelomičnog isparavanja goriva. Egzotermnost reakcije izgaranja osigurava povišenje lokalne temperature i tlaka. Zapaljenjem određene količine smjese u lokalnom području kraj svjećice dolazi do prijenosa topline na još neizgorene slojeve, a samim time i do gibanja smjese. Navedena pojava pojasa izgaranja kroz cijelu komoru označava frontu plamena, a njena brzina pokazuje da izgaranje nije proces eksplozije, ali da mora biti dovoljno brz kako bi se

osiguralo djelotvorno izgaranje i pri najvećim brzinama vrtnje motora. Brzina širenja plamene fronte u dvotaktnom motoru kreće se od 20 do 50 m/s.[13]

Kod Otto motora, idealno gorivo predstavlja izooktan ( $C_8H_{18}$ ).

#### *Detonantno izgaranje*

Nepoželjnu pojavu u Ottovom motoru predstavlja detonantno izgaranje, pojava koja se javlja uslijed naglog izgaranja goriva, a izaziva nagle oscilacije tlaka koje mogu uzrokovati oštećenja u motoru.[20] Dosadašnjim istraživanjima navedene pojave utvrđeno je da do zapaljenja neizgorjele smjese najčešće dolazi uslijed samozapaljenja njenih vrućih dijelova.[20] Parametri rada motora koji utječu na detonantno izgaranje su opterećenje motora, brzina vrtnje, točka paljenja, kompresijski omjer, faktor zraka, temperatura i tlak usisne smjese, način formiranja smjese i temperatura stijenki prostora izgaranja.

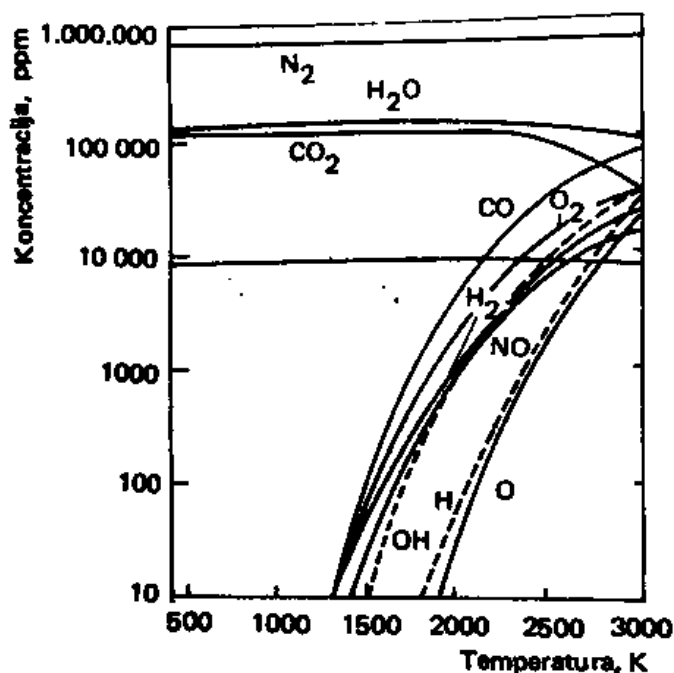
#### **3.7.1.2. Izgaranje u Diesel motoru**

U dizelskom motoru zrak se komprimira s tolikim kompresijskim omjerom da se ubrizgavanjem tekućega goriva postiže njegovo isparavanje i samozapaljenje u zraku, uz relativno velike vrijednosti faktora zraka ( $\lambda \geq 1,3$ ) i ograničeni broja okretaja motora koji varira od 3.000 do 5.000  $\text{min}^{-1}$ . U taktu kompresije, u komprimirani zrak ubrizgava se gorivo prilikom čega dolazi do izgaranja. Komprimirani zrak u komori izgaranja zagrijava kapljice goriva do temperature isparavanja, a zatim takvo gorivo zagrijava do točke samozapaljenja.[20] Temperatura zraka na kraju kompresije viša je od temperature samozapaljenja goriva ubrizgavanog na kraju procesa kompresije.

Za ovakvo izgaranje idealno gorivo je dodekan ( $C_{12}H_{26}$ ). Zbog složenije strukture potrebno je više energije za kidanje ugljik-vodik veza, pa je sporiji i porast tlaka tijekom kompresije i izgaranja, a sam proces odvija se u siromašnjoj smjesi. [13]

#### **3.8. Produkti izgaranja**

Ravnotežni sastav produkata izgaranja određene gorive smjese ovisi o temperaturi i tlaku izgaranja. Na slici 7. prikazana je ovisnost ravnotežnog sastava produkata izgaranja smjese nekog ugljikovodika i zraka pri konstantnom tlaku. No, stvarni sastav produkata izgaranja ovisi o načinu i kvaliteti miješanja goriva i zraka, konstrukciji komore izgaranja, uvjeta izmjene topline s okolinom i sl.



**Slika 7.** Ravnotežni sastav produkata izgaranja stehiometrijske smjese heptana i zraka u ovisnosti o temperaturi [25]

U osnovne produkte izgaranja  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{O}$ ,  $\text{H}$  i  $\text{N}$ , u različitim fazama procesa izgaranja formira se čitav niz produkata termičkog razlaganja i parcijalne oksidacije goriva -čvrste lebdećečestice, PM. Produkti termičkog razlaganja i nepotpunog izgaranja ugljikovodika mogu sadržavati velik broj različitih organskih spojeva (parafini, olefini, policiklički aromati) i čađu. [5]

Sumpor iz goriva u procesu izgaranja oksidira većim dijelom do  $\text{SO}_2$ , ali dijelom i direktno u  $\text{SO}_3$ . U atmosferi  $\text{SO}_2$  nastavlja reagirati do  $\text{SO}_3$ , koji s vlagom iz zraka daje fine kapljice sumporne kiseline koje su pak jedan od uzroka kiselih kiša. [26]

Oksidi dušika i sumpora dovode do stvaranja aerosola, dušikovi oksidi vode do nastajanja fotokemijskog smoga, a oksidi sumpora do stvaranja kiselih kiša.

Nakupine aglomeriranih čestica ugljika stvaraju čađu. Ove čestice stvaraju se također kao produkti nepotpunog gorenja.

Osim navedenih, i toplina oslobođena izgaranjem ubraja se u štetne produkte.

Faktori navedeni u ovom poglavlju samo su neki od parametara koji utječu nastvaranje ovih čestica.

## 4. ANALIZA ČESTICA IZGARANJA

Emisija čestica iz prijevoznih sredstava sve je češći predmet istraživanja zbog negativnog utjecaja na okoliš i zdravlje ljudi. Stoga je razumljivo da je sve veći broj propisa i tehnoloških projekata usmjeren na razumijevanje stvaranja čestica u motorima s unutrašnjim izgaranjem, kao i smanjenju njihove emisije.

Emisije	Mjerne jedinice	Euro 5a	Euro 5b	Euro 6b	Euro 6c
		Rujan 2009	Rujan 2011	Rujan 2014	Rujan 2017
PM	mg/km	5	4.5	4.5	4.5
PN	#/km	-	-	$6.0 \times 10^{12}$	$6.0 \times 10^{11}$

**Slika 8.** Tablični prikaz razvoja standarda EU za dozvoljene količine emisija PM čestica iz benzinskih motora [27]

Otto motori, motori s izravnim ubrizgavanjem benzina ključni su čimbenici za smanjenje emisije CO<sub>2</sub> iz benzinskih vozila. Manji omjeri kompresija i više temperature nego kod Diesel motora za posljedicu imaju veću volumetrijsku učinkovitost uz manju potrošnju goriva. No, zbog kraćeg vremena za oksidaciju goriva, većina Otto motora stvara jedan do dva puta veće emisije PM čestica. [28]

U radu su predstavljene dvije metode određivanja veličina čestica. DMA metoda za analizu čestica raspodjele veličina u rasponu od 3 do 60 nm i ELPI metoda korištena za analizu većih čestica, u rasponu od 7 do 10 μm. [29]

### 4.1. Formiranje čestica

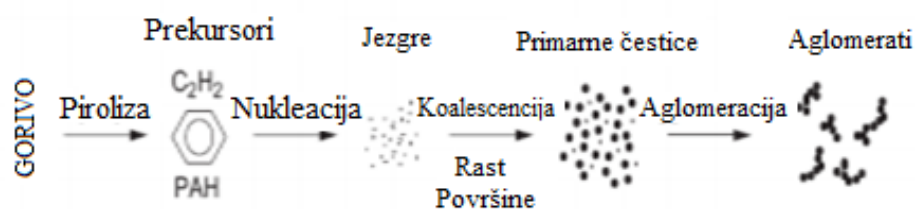
Čestice se mogu emitirati izravno iz motora, a mogu nastati naknadno u atmosferi. Dijele se na primarne i sekundarne gdje su primarne (5-30 nm)[27] one koje se emitiraju iz izvora u atmosferu, a sekundarne one formirane reakcijama sa zrakom. Tim reakcija one stvaraju hlapive komponente koje kondenziraju u tekuće ili čvrsto stanje formirajući PM čestice. [30, 31]

Čađa još uvijek nije strogo definirana supstanca, no generalno govoreći smatra se čvrstom tvari sastavljenoj od ugljika i vodika u omjeru 8:1. [32] Stvaranje čađe posljedica je nepotpunog izgaranja goriva pri povišenim temperaturama. Prema izvoru [33] gustoća čađe



kreće se oko vrijednosti  $1.84 \text{ g/cm}^3$ . Uz čestice čađe, kojih kod Diesel motora nastaje više od 50% u ispušnim plinovima, druge sitne čestice koje nastaju uključuju djelomično ili neizgoreno gorivo ili motorno ulje, vezanu vodu, metale i aditive iz goriva (Zn, Mg, P i S). [27]

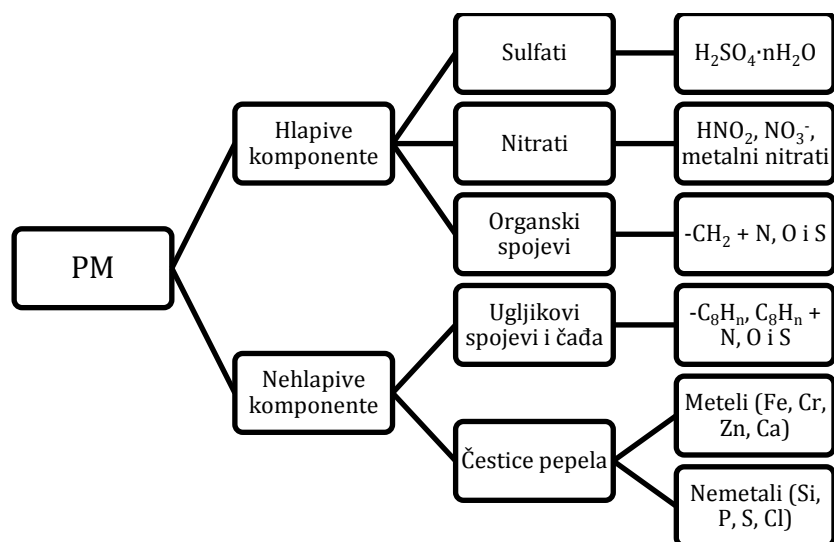
Stvaranje čestica u komori izgaranja složena je kombinacija kemijskih i fizikalnih procesa (nukleacija, piroliza, oksidacija, vlaženje klipa, karbonizacija, koagulacija i aglomeracija čestica) [34-37] Najveći doprinos u komori izgaranja na stvaranje ima proces pirolize kojim se molekule goriva raspadaju na vodik (H), hidroksil radikala ( $\cdot\text{OH}$ ), metilne radikale i organske spojeve poput etena ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ) i etina ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ). Spomenuti radikali i organski spojevi sudjeluju u stvaranju policikličkih aromatskih ugljikovodika, koji su poznati kao prekursori stvaranju čađe te se kao takvi ubrajaju u primarne čestice. [27] Takve primarne čestice sudaranjem rastu u veće i stvaraju aglomerate (70-100 nm) što je pojednostavljeno prikazano slikom 9.



**Slika 9.** Shematski prikaz stvaranja čađe

Čestice metala u ispušnim plinovima uključuju željezo, bakar, nikal i druge metalne spojeve poput metalnih oksida koji potječu od motornih ulja koji sadrže metalne organske komponente (aditivi) i mehaničkog trošenja dijelova motora (dijelovi klipa, cilindri, ventili). Motornim ulje ove se čestice unose u komoru izgaranja gdje djelomično isparavaju i tvoreultrafine sitne čestice ( $< 50 \text{ nm}$ ). [38]

Sastav emisija PM čestica određen je svojstvima goriva, mazivima, uvjetima rada motora (temperatura rashladnog sredstva, opterećenje motora, brzina motora) i tehnologijama za naknadu obradu ispušnih plinova. [39] Model sastava PM čestica prikazan je na slici 10.



Slika 10. Konceptualni model tipičnog sastava PM čestica [27]

## 4.2. Metode analize čestica

Tablica 2. Postavke ispitivanih motora

Motor	Otto			Diesel	
Broj taktova	4			4	
Broj cilindara	4			4	
Broj ventila	16			16	
Kompresijski omjer	10,6:1			16,8:1	
Volumen motora, L	1,2			1,9	
Broj okretaja, min <sup>-1</sup>	1000	2000	3000	1500	2000
Punjenje, %	50		100	50	100

U tablici 2. prikazani su postavljeni parametri motora korišteni za analizu čestica. Svako mjerenje provedeno je po 10 minuta, pri temperaturama ispušne struje većim od 500 K. [29]

### 4.2.1. DMA metoda

Metoda analize diferencijalne električne mobilnosti općeprihvaćena je metoda određivanja raspodjele veličina čestica nastalih izgaranjem goriva. Mjerenja zahtijevaju veliko razrjeđenje uzorka smjese kako bi se smanjili utjecaji temperature i koncentracije i izbjegle daljnje reakcije koagulacije, što utječe na točnost mjerenja. Metoda koristi električno polje za klasifikaciju i analizu nabijenih čestica aerosola veličine od 1nm do 1 $\mu$ m u plinovitoj fazi. Aparatura se najčešće sastoji od četiri dijela: početnog razdjeljivača (engl. *pre-separator*) koji limitira maksimalnu veličinu čestica, generatora naboja čestica (engl.

*particlechargeconditioner*) koji daje česticama aerosola poznat naboj, diferencijalnog spektrometra električne pokretljivosti (engl. *differentialelectricalmobilityspectrometer*) koji razdvaja čestice s pokretljivošću različitom od laminarnog toka i detektora čestica aerosola (engl. *aerosol particledetector*) koji koristi aerosolni elektrometar ili brojač kontinuiranog toka kondenziranja čestica. Čestice se nabijaju pomoću zračenja iz radioaktivnog izvora, a pozitivni i negativni ioni u plinovitom stanju difundiraju među čestice aerosola dok se ne postigne ravnoteža među nabojima. [40] Mobilnost, odnosno raspodjela veličina čestica određuje se brojanjem čestica na izlazu iz detektora, mijenjanjem primijenjenog napona. [28] Funkcija raspodjele veličina čestica određuje se softverskim programom.

#### **4.2.2. ELPI sustav**

Druga metoda koja se može koristiti za određivanje broja i raspodjele veličina čestica je ELPI sustav (engl. *ElectricalLowPressureImpactor*) klasificiranjem čestica na temelju njihovog aerodinamičkog promjera. Sustav kombinira načela detektiranja osnovanim na elektricitetu i klasifikaciji veličina. Prije ulaska u uređaj emisijski plinovi, kao i kod DMA metode, razrjeđuju se u dva koraka kako bi se omogućila kontrola omjera razrjeđenja i temperature. Metoda se zasniva na nabijanju čestica određenog naboja nabijanjem koronom<sup>1</sup>, zatim se struja aerosola podvrgava niskom tlaku u kaskadnom impaktoru, a zatim slijedi prikupljanje čestica u 12 različitih faza. U prvoj fazi na kolektorskoj ploči zaostaju velike PM čestice, velike kinetičke energije. Manje čestice posjeduju manje energije i gibaju se dalje kroz faze.

Vidljivo je da ovakvim načinom rada sustav odvaja čestice na osnovi njihove veličine, konkretno, njihovog aerodinamičkog promjera. Svaka faza sadrži osjetljivi elektrometar koji mjeri odnos struje i naboja čestice. Može se spomenuti i da se mjerenja ovom metodom mogu obavljati u stvarnom vremenu (engl. *real-time*).[29]

#### **4.2.3. Klasične metode analize**

Konvencionalne ili klasične metode koje se najčešće koriste za analizu veličina čestica su analize infracrvenim zračenjem (za ugljikovodike) i analize UV kemiluminiscencijom (za NO<sub>x</sub> spojeve). Koncentracija mase čestica dobiva se mjerenjem neprozirnostiopacimetrom<sup>2</sup>. [29]

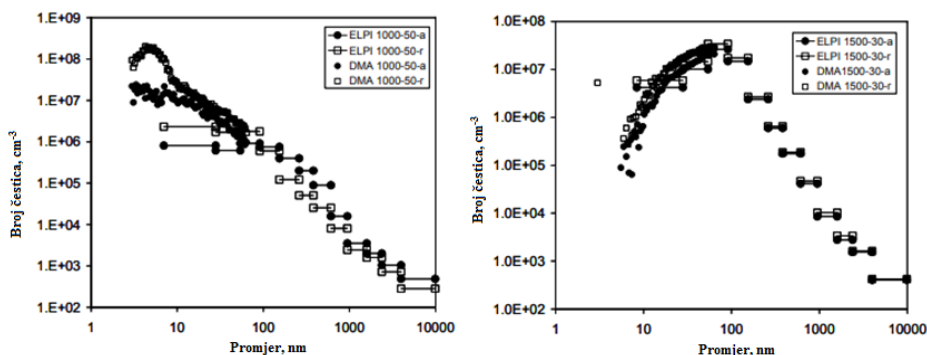
---

<sup>1</sup> korona - električna pojava kada gradijent jačine električnog polja oko elektrode prekorači određenu graničnu vrijednost, pri čemu njezino nastajanje ovisi o jačini napona, obliku i razmaku elektroda, gustoći, vlazi, temperaturi i vodljivosti plina, no ne ovisi o načinu spajanja elektrode na izvor napona [45]

<sup>2</sup>opacimetar - uređaj za mjerenje pada intenziteta svjetlosti koja prolazi kroz uzorak ispušnog plina [18]

#### 4.2.4. Rezultati analize čestica goriva

Rezultati prikazani na slici 11. pokazuju da je u benzinu veća koncentracija manjih čestica, posebno onih u području ispod 30 nm.

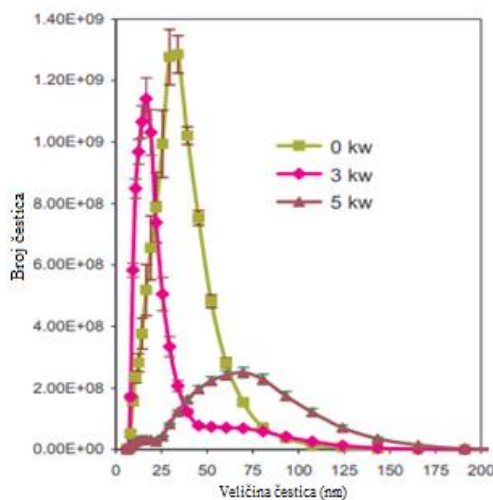


Slika 11. Raspodjela veličine čestica za benzin (lijevo) i diesel (desno)

DMA metoda dala je slične rezultate kao i ELPI za diesel, ali kod benzina pojavljuju se razilaženja jer je najveća koncentracija čestica u području od 7 do 30 nm što je ujedno i najmanje područje rada za ELPI. [29]

#### 4.3. Utjecaj različitih faktora na raspodjelu veličine čestica

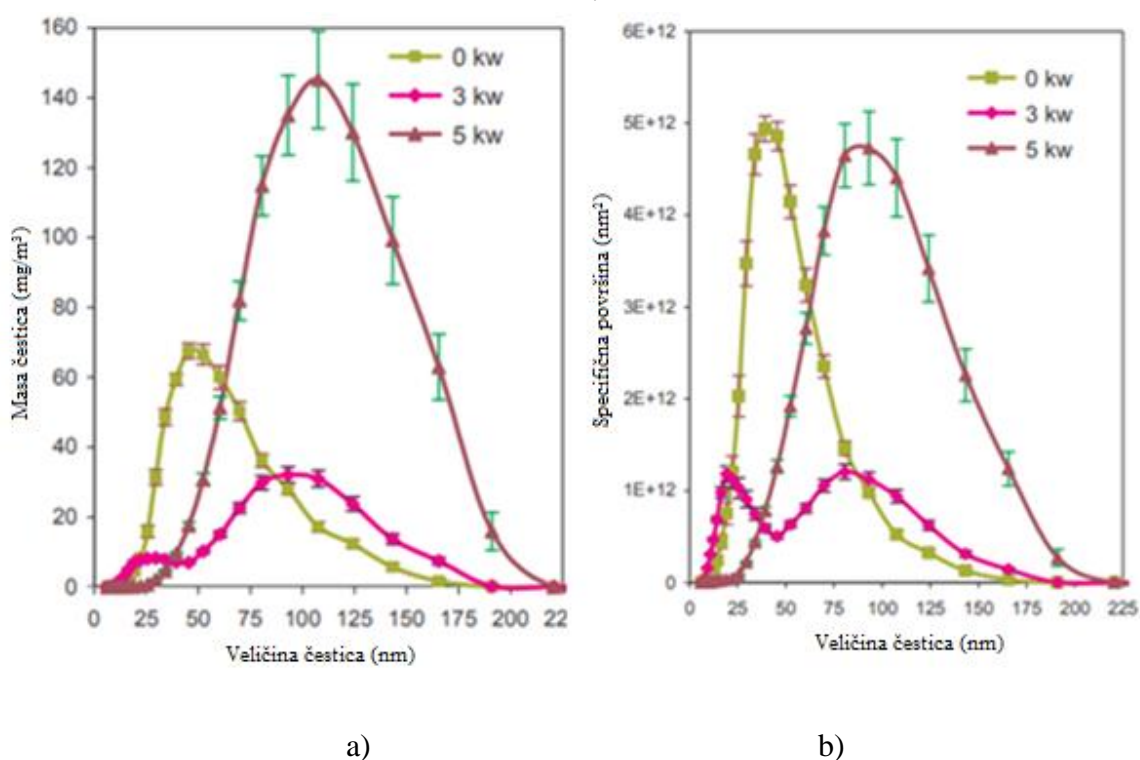
Dok su DiIorio i suradnici [29] pokazali kako vrsta goriva utječe na veličinu i raspodjelu čestica, D.K. Srivastava i A.K. Agarwal [32] promatrali su utjecaj opterećenja motora (engl. *engine load*) na raspodjelu čestica u diesel gorivu. Dobiveni rezultati prikazani su na slici 12.



Slika 12. Raspodjela veličine i broja čestica emitiranih iz Diesel motora pod različitim opterećenjima

Iz rezultata je vidljivo da pri manjem opterećenju motora dominiraju čestice u rasponu veličina od 40 do 50 nm. Povećanjem opterećenja smanjuje se raspon krivulje i veličina čestica na 20-25 nm. Daljnjim povećanjem smanjuje se broj malih čestica te dominiraju čestice u području od 60 do 70 nm. Zanimljivo je uočiti da se širina raspodjele značajno mijenja porastom opterećenja motora (kW). Porast opterećenja motora uzrokuje porast temperature komore izgaranja ismanjenje faktora zraka što pogoduje aglomeraciji i stvaranju čađe.

Osim što su odredili veličinu i raspodjelu čestica, ispitali su i kako se masa (slika 13a), odnosno specifična površina (slika 13b) mijenja s veličinom čestice. Rezultati su prikazani na slici 13.



**Slika 13.** Raspodjela a) veličina i mase i b) veličina i specifičnih površina čestica emitiranih iz Diesel motora pri različitim opterećenjima

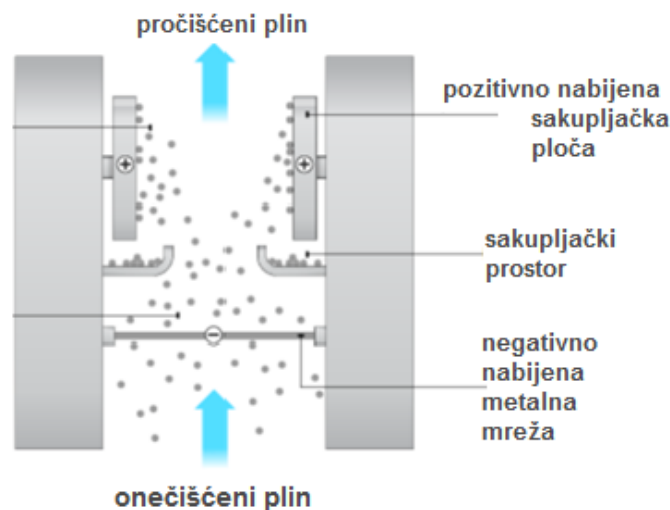
Kada se govori o toksičnosti čestica, specifična površina čestice može biti značajan pokazatelj. Manje čestice imaju veću specifičnu površinu od većih čestica iste mase te su stoga pogodnije za kondenzaciju štetnih hlapivih organskih spojeva (VOC) i policikličkih aromatskih ugljikovodika (PAH). Dakle, manje čestice predstavljaju veću opasnost za ljudsko

zdravlje. Masa nastalih čestica značajna je sa stajališta definiranja normi za regulaciju emisije ispušnih plinova. Iz raspodjele je vidljivo da masa čestica raste s opterećenjem motora.

#### 4.4. Obrada PM čestica

Velika učinkovitost (do 99%) za uklanjanje finih (sitnih) čestica pokazuje filtracija elektrostatskom precipitacijom, odnosno elektrofiltrom. Zbog mogućnosti rada pri visokim temperaturama (do 700 °C) [41] i visokim tlakovima (do 1030 kPa) [41], ali i niskih radnih troškova ne iznenađuje činjenica da je danas jedan od uređaja najšire primjene za uklanjanje spomenutih čestica. [42]

Elektrostatski precipitator (ESP) ili elektrofiltar koristi električni naboj za uklanjanje određenih nečistoća, sitnih čvrstih čestica, iz zraka ili drugih dimnih plinova. [43] Čestice suspendirane u struji plina ulaskom u elektrofiltar bivaju električki nabijene i uklanjaju se djelovanjem električnog polja. Shema jednostavnog elektrofiltara prikazana je na slici 1. Osnovni dijelovi su izvor istosmjerne struje visokog napona, ionizirajuća elektroda, sakupljačka (kolektorska) elektroda te sakupljački prostor. [41] Izvorno je dizajniran za uporabu vrijednih industrijsko-procesnih materijala, no danas veću ulogu ima kao instrument za kontrolu onečišćenja zraka, odnosno za uklanjanje čestica iz otpadnih plinova u industrijskim postrojenjima i elektranama. [43]

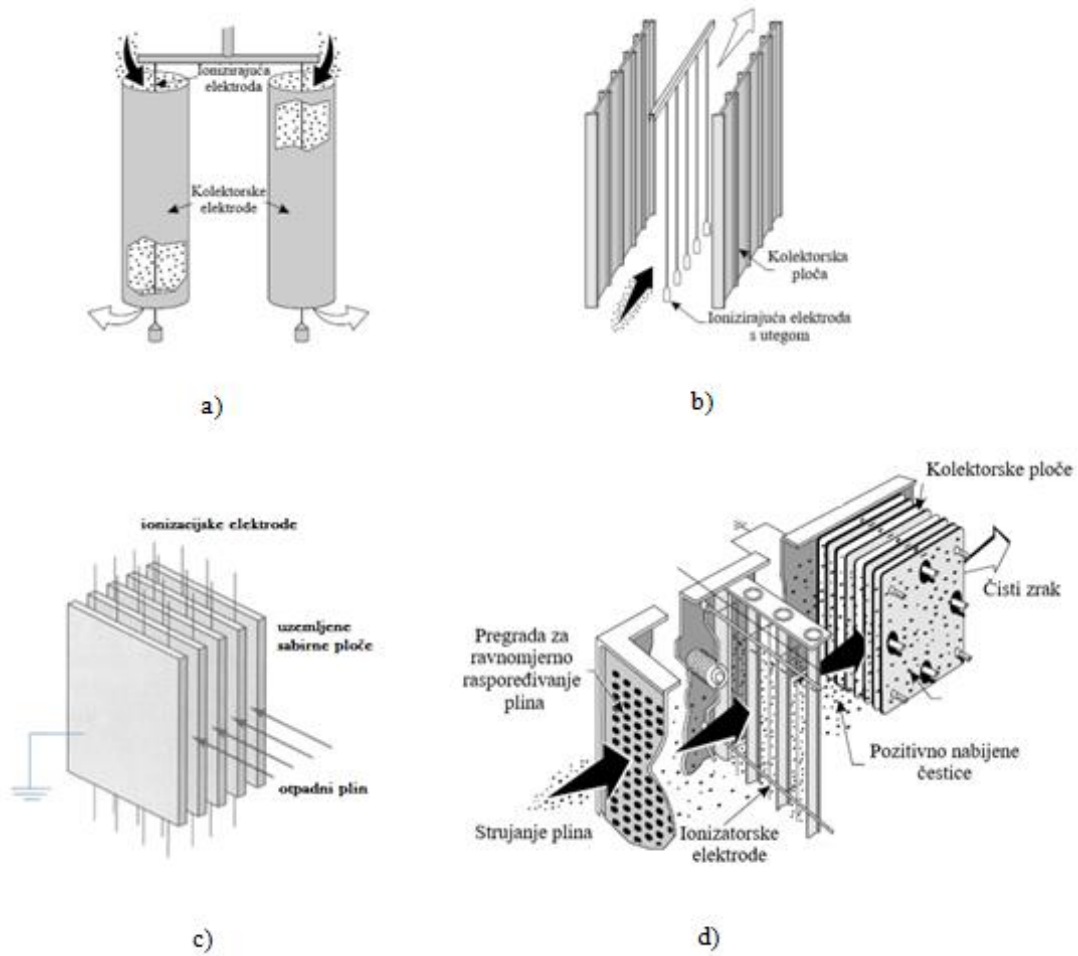


**Slika 14.** Shema jednostavnog elektrofiltara [44]

Dizajn precipitatora ovisi o geometriji ionizacijske elektrode i njenom razmaku od kolektorske elektrode. Različite izvedbe ionizacijske i sakupljačke elektrode su moguće. Tri

osnovne, i to prema rastućem kapacitetu, su žica u cijevi, žica između dviju ploča i više žica između dviju ploča. Udaljenost između elektroda određuje se prema koncentraciji čestica u plinu. [45]

Konfiguracija elektrostatskih precipitatora odvija se na nekoliko načina, a slikom 15. pojednostavljeno su prikazane osnovne izvedbe: cijevna (a), pločasto-žičana (b), pločasta (c) i dvostupanjska (d).



**Slika 15.** Shematski prikaz osnovnih izvedbi elektrostatskih precipitatora [46, 47]

## 5. ZAKLJUČAK

Standardi Europske unije za dozvoljene mase i količine produkata ispušnih plinova iz prijevoznih sredstava svake se godine postrožuju, što ukazuje na postojanje značajnog učinka nastalih čestica na okoliš.

Gorenje u motorima s unutrašnjim izgaranjem složen je proces kojim, zbog utjecaja različitih faktora poput kompresijskog omjera ili faktora zraka, nastaje niz produkata različitih veličina. Sa stajališta ekologije i učinaka na ljudsko zdravlje čestice manje od 10 nm, veće specifične površine, pogodne za apsorpciju raznih toksičnih spojeva, značajne su za promatranje. Istraživanja su pokazala da na veličinu čestica utječe vrsta goriva, aditivi, motorna ulja, volumen reakcijskog prostora, način rada motora i brojni drugi čimbenici.

Modernija prijevozna sredstva već posjeduju određena poboljšanja, no rezultati mjerenja veličine i broja čestica koje nastaju emisijom ispušnih plinova svakako daju prostor za predlaganje metoda pročišćavanja štetnih čestica. Jedan od uređaja za uklanjanje takvih ultrafinih čestica je elektrostatski precipitator, čija je upotreba danas usmjerena na industriju, no zbog svoje visoke učinkovitosti predstavlja dobru osnovu za izvedbu sličnog uređaja šire primjene.



## 6. LITERATURA

- [1] Air pollution, InternalCombustionEngines<https://authors.library.caltech.edu/25069/6/AirPollution88-Ch4.pdf> (pristup 28. kolovoza 2018)
- [2] Filipan V., Tehnička termodinamika, interna skripta, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2017.
- [3] Mihoci, L., Analiza rada HCCI motora pri pogonu etanolom, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2013.
- [4] Korištenje interneta  
<http://www.pearltrees.com/joshclayton/engines/id12592399/item125108323> (pristup 28. kolovoza 2018.)
- [5] JoksimovićTjapkin S., Procesi sagorevanja, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 1981.
- [6] Sutlović I., Upravljanje energijom, Interna skripta, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2017.
- [7] Belošević I., Optimiranja smjesa u proizvodnji dizelskih ibenzinskih goriva, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2010.
- [8] Polarecki M., Termodinamička analiza energetskogdjela rafinerijskog postrojenja, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2017.
- [9] Milanović N., Aditivi u motornom benzinu i dizelskom gorivu, završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2016.
- [10] Ukapljeni naftni plin UNP/LPG  
<https://rudar.rgn.hr/~dkarasal/NIDS/GOSPODARENJE%20PLINOVIMA%20/UNP.pdf> (pristup 29. kolovoza 2018.)
- [11] Korištenje interneta  
[https://hr.wikipedia.org/wiki/Ukapljeni\\_naftni\\_plin](https://hr.wikipedia.org/wiki/Ukapljeni_naftni_plin) (pristup 29. kolovoza 2018.)
- [12] Matijašić G., Jedinične operacije u ekoinženjerstvu, Mehaničke operacije, interna skripta, 2. dio, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2016.
- [13] Jelić, M., Dvornik J., Doprinos analizi procesa u cilindru motora SUI, Naše more 55, 3-4 (2008)
- [14] Kühner A. Prijedlog uređenja instalacija potrebnih za rad Laboratorija, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2008.
- [15] Mihalec I., Lulić Z., Kozarac D., Motori s unutarnjim izgaranjem, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2010.

- [16] Hesketh H. E., Air pollution control, Ann Arbor Science Publishers, Inc., 1979, str. 45.
- [17] Joksimović Tjapkin S., Procesi sagorevanja, Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu, 1981. str. 147
- [18] Korištenje interneta  
[http://mervik.ba/downloads/tehnika/edukacija/2012-08-SI-IPI-Uredjaj\\_za\\_mjerenje\\_izduvnih\\_gasova.pdf](http://mervik.ba/downloads/tehnika/edukacija/2012-08-SI-IPI-Uredjaj_za_mjerenje_izduvnih_gasova.pdf) (pristup 13. rujna 2018.)
- [19] Korištenje interneta  
<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=27966> (pristup 11. rujna 2018.)
- [20] Tomić R., Model detonantnoga izgaranja u Ottovom motoru, doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagerbu, Zagreb, 2015.
- [21] Colin R. Ferguson, Internal Combustion Engines, John Wiley & Sons, 1986.
- [22] Dobovšek, Ž., Samec N., Kokalj F., Razvoj motora s unutarnjim izgaranjem i kvaliteta goriva, Goriva i maziva 42, 1:5-27, 2003.
- [23] Warnatz, J., Mass, U., Dibble, R.W.: Combustion: physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant formation, 4th ed. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2006.
- [24] Laguitton O.<sup>1</sup>, Crua C.<sup>2</sup>, Cowell T.<sup>2</sup>, Heikal, M. R.<sup>2</sup>, Gold M. R., The effect of compression ratio on exhaust emissions from a PCCI diesel engine, Energy Conversion and Management, 2007
- [25] Joksimović Tjapkin S., Procesi sagorevanja, Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu, 1981. str. 362
- [26] kisela kiša, Hrvatska enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža [www.enciklopedija.hr](http://www.enciklopedija.hr), (pristup 7. rujna 2018.)
- [27] Raza M., Chen, L., Leach F., Ding S., A Review of Particulate Number (PN) Emissions from Gasoline Direct Injection (GDI) Engines and Their Control Techniques, School of Energy and Power Engineering, Energy and Environment International Center, Beihang University, Beijing, China, 2018.
- [28] Kittelson, D., Kraft, M., Particle Formation and Models in Internal Combustion Engines, Cambridge Centre for Computational Chemical Engineering, UK, 2014.
- [29] Di Iorio, S., Merola, S.S., Vaglieco, B.M., D'Anna, A., Minutolo, P., Particulate Emission from Internal Combustion Engines, Napoli, Italija  
<http://www.aidic.it/aaas08/webpapers/62DiIorio.pdf> (pristup 8. rujna 2018.)
- [30] Yao, Q., Li, S.Q., Xu, H.W., Zhuo, J.K., Song, Q., Reprint of: Studies on formation and control of combustion particulate matter in China: A review. Energy 2010, 35, 4480–4493.

- [31] Kelly, F.J., Fussell, J.C., Size, source and chemical composition as determinant of toxicity attributable to ambient particulate matter. *Atmos. Environ.* 2012, 60, 504–526.
- [32] Srivastava, D.K., Agarwal, A.K., Particulate Matter Emissions from Single Cylinder Diesel Engine: Effect of Engine Load on Size and Number Distribution, Indian Institute of Technology Kanpur, Kanpur, India, SAE International, 2008
- [33] Choi MY, Hamins A., Mulholland GW, Kashiwagi T., Simultaneous optical measurement of soot volume fraction and temperature in premixed flames, *Combustion & Flame*, 99, 174-86, 1994.
- [34] Überall, A., Otte, R., Eilts, P., Krahl, J., A literature research about particle emissions from engines with direct gasoline injection and the potential to reduce these emissions. *Fuel* 2015, 147, 203–207.
- [35] Smith, O.I. Fundamentals of soot formation in flames with application to diesel engine particulate emissions. *Prog. Energy Combust. Sci.* 1981, 7, 275–291.
- [36] Glassman, I. Soot formation in combustion processes. In *Symposium (International) on Combustion*, Elsevier: New York, NY, USA, 1989, Volume 22, pp. 295–311.
- [37] Dobbins, R.A., Fletcher, R.A., Lu, W., Laser microprobe analysis of soot precursor particles and carbonaceous soot. *Combust. Flame* 1995, 100, 301–309.
- [38] Mayer, A., Czerwinski, J., Kasper, M., Ulrich, A., Mooney, J.J., Metal Oxide Particle Emissions from Diesel and Petrol Engines, SAE Technical Paper, SAE International: Warrendale, PA, USA, 2012.
- [39] Andrews, G.E., Abbass, M.K., Williams, P.T., Bartle, K.D., Factors influencing the composition of the organic fraction of diesel particulates. *J. Aerosol. Sci.* 1989, 20, 1373-1376.
- [40] Babić, H., Metode određivanja veličine čestica, završni rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za kemiju, Osijek, 2012.
- [41] Cheremisinoff, N. P., *Handbook of air pollution prevention and control*, Butterworth, Heinemann, SAD, 2002.
- [42] Theodore, L., *Electrostatic Precipitators in Air Pollution Control Equipment Calculations*, Wiley, 2008.
- [43] Korištenje interneta  
<https://www.britannica.com/technology/electrostatic-precipitator> (pristup 28. srpnja 2018)

[44] Vrsaljko D., Procesna oprema u ekoinženjerstvu, interna skripta, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2017.

[45] Oglesby S. Jr., Nichols G.B., A Manual of Electrostatic Precipitator Technology Part I - Fundamentals, Southern Research Institute, SAD, 1970.

[46] Fuliful F. K., Hamood A. A., Collection Efficiency of Wire-Duct Electrostatic Precipitator, OmniScriptum Publishing Group, Mauritius, 2017.

[47] Korištenje interneta

<https://www.slideshare.net/jshrikant/1-28-final> (pristup 8. kolovoza 2018.)

## 7. ŽIVOTOPIS

Sandra Trstenjak [REDACTED] Osnovnu školu završava 2008. godine u Prelogu. Srednjoškolsko obrazovanje nastavlja u Gimnaziji Čakovec, opći smjer, koju završava 2012. godine kada upisuje i Fakultet kemijskog inženjerstva. Preddiplomski studij ekoinženjerstva upisuje akademske godine 2015./2016.

Dugogodišnja je članica studentskog zbora Fakulteta, a od ove akademske godine i Povjerenstva za upravljanje kvalitetom.

Kroz cjelokupno obrazovanje aktivno se bavi sportom, a 2016. godine osvaja sveučilišno prvenstvo Hrvatske u rukometu.