

# Komore izgaranja zrakoplovnih mlaznih motora s niskom razinom onečišćenja dušičnim oksidima

---

Lukić, Luka

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:596724>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-06**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Transport and Traffic Sciences - Institutional Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

**Luka Lukić**

**KOMORE IZGARANJA ZRAKOPLOVNIH  
MLAZNIH MOTORA S NISKOM RAZINOM  
ONEČIŠĆENJA DUŠIČNIM OKSIDIMA**

**ZAVRŠNI RAD**

**Zagreb, 2021.**

Zagreb, 11. svibnja 2021.

Zavod: **Zavod za aeronautiku**  
Predmet: **Zrakoplovni pogonski sustavi II**

## **ZAVRŠNI ZADATAK br. 6461**

Pristupnik: **Luka Lukić (0135253757)**  
Studij: **Aeronautika**  
Smjer: **Pilot**  
Usmjerenje: **Vojni pilot**

Zadatak: **Komore izgaranja zrakoplovnih mlaznih motora s niskom razinom onečišćenja dušičnim oksidima**

Opis zadatka:

U radu je potrebno opisati princip rada klasične komore izgaranja mlaznih motora, te opisati mehanizme nastajanja produkata izgaranja i dušičnih oksida. Opisati utjecaj dušičnih oksida na okoliš i zdravlje. Analizirati regulativu i moguća konstrukcijska rješenja komore sa smanjenjem razinom onečišćenja dušičnim oksidima. Opisati praktična rješenja komora s niskom razinom onečišćenja u uporabi.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

---

prof. dr. sc. Ernest Bazijanac

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti

## **ZAVRŠNI RAD**

**KOMORE IZGARANJA ZRAKOPLOVNIH MLAZNIH  
MOTORA S NISKOM RAZINOM ONEČIŠĆENJA  
DUŠIČNIM OKSIDIMA**

**COMBUSTION CHAMBERS OF AIRCRAFT JET  
ENGINES WITH LOW LEVELS OF NITROGEN  
OXIDE POLLUTION**

Mentor: prof. dr. sc. Ernest Bazijanac

Student: Luka Lukić  
JMBAG: 0135253757

Zagreb, rujan 2021.

## **SAŽETAK**

Zračni promet ima značajne posljedice na okoliš u cijelom svijetu, uključujući i posljedice na klimu. Emisije ispušnih plinova mlaznih zrakoplova talože se izravno u gornju atmosferu, a neke zagrijavaju atmosferu više od plinova ispuštenih bliže površini. Emisije, osobito emisije NO<sub>x</sub>, jedan su od primarnih problema komora izgaranja zrakoplovnih mlaznih motora. Kontrola emisija dušičnog oksida u zrakoplovnim mlaznim motorima može se izvesti pomoću različitih pristupa. U ovom završnom radu analizirane su tehnologije s najvećim potencijalom za smanjenje emisije NO<sub>x</sub> u zrakoplovnim mlaznim motorima.

**KLJUČNE RIJEČI:** komora izgaranja; dušični oksidi; okoliš; zdravlje

## **SUMMARY**

Air transportation has significant environmental impacts worldwide, including climate impacts. Jet exhaust emissions are deposited directly into the upper atmosphere, and some of them warm the atmosphere more than gases emitted closer to the surface. Emissions, especially NO<sub>x</sub> emissions, are one of the primary problems of combustion chambers of aircraft jet engines. Control of nitrogen oxide emissions in aircraft jet engines can be performed using variety of approaches. In this final paper, the technologies with the greatest potential for reducing NO<sub>x</sub> emissions in aircraft jet engines are analyzed.

**KEYWORDS:** combustion chamber; nitrogen oxide; environment; health

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2. KLASIČNA KOMORA IZGARANJA MLAZNIH MOTORA</b> .....	<b>3</b>
2.1. RAZVOJ KLASIČNE KOMORE IZGARANJA .....	3
2.2. PRINCIP RADA KLASIČNE KOMORE IZGARANJA.....	5
2.3. VRSTE KOMORA IZGARANJA .....	6
<b>3. MEHANIZMI NASTAJANJA ŠTETNIH SPOJEVA U KOMORI IZGARANJA</b> .....	<b>7</b>
3.1. NASTAJANJE UGLJIČNOGA MONOKSIDA .....	8
3.2. NASTAJANJE NESAGORJELIH UGLJIKOVODIKA.....	10
3.3. NASTAJANJE DIMNOSTI .....	10
3.3.1. Utjecaj tlaka zraka .....	10
3.3.2. Utjecaj vrste goriva.....	11
3.3.3. Utjecaj kvalitete raspršivanja goriva .....	11
3.4. NASTAJANJE DUŠIČNIH OKSIDA .....	12
3.4.1. Termički NO <sub>x</sub> .....	12
3.4.2. Promptni NO <sub>x</sub> .....	14
3.4.3. Gorivni NO <sub>x</sub> .....	15
3.4.4. Oksidacija dušika .....	15
3.4.5. Utjecaj tlaka na formiranje NO <sub>x</sub> spojeva .....	16
3.4.6. Utjecaj raspršivanja goriva na formiranje NO <sub>x</sub> spojeva.....	16
<b>4. UTJECAJ DUŠIČNIH OKSIDA NA OKOLIŠ I ZDRAVLJE</b> .....	<b>18</b>
4.1. KISELA KIŠA .....	18
4.2. FOTOKEMIJSKI SMOG .....	19
4.3. UTJECAJ NA ZDRAVLJE .....	20
<b>5. REGULATIVA VEZANA ZA EMISIJE ZRAKOPLOVNIH MLAZNIH MOTORA</b> .....	<b>21</b>
<b>6. KONSTRUKCIJSKA RJEŠENJA KOMORE ZA SMANJENJE ONEČIŠĆENJA</b> .....	<b>24</b>
6.1. KOMORE S FAZNIM IZGARANJEM.....	25
6.2. RQL KOMORE .....	27
6.2.1. Pregled RQL tehnologije .....	29
6.2.2. Primjena RQL tehnologije .....	31
6.3. KOMORA S DVOSTRUKIM PRSTENASTIM PRETHODNO VRTLOŽNIM MIJEŠANJEM GORIVA I ZRAKA.....	32
6.3.1. Razvoj TAPS komora .....	34
6.3.2. Budućnost TAPS-A .....	36
<b>7. DALJNI RAZVOJ KOMORA S NISKOM RAZINOM ONEČIŠĆENJA NO<sub>x</sub></b> .....	<b>38</b>

7.1. LDI I MLDI KOMORE IZGARANJA .....	38
7.2. LEAN PREMIXED PREVAPORISED COMBUSTORS (LPP) .....	40
7.3. KOMORE IZGARANJA PROMJENJIVE GEOMETRIJE.....	42
<b>8. PREGLED PERFORMANSI KOMORA IZGARANJA .....</b>	<b>44</b>
<b>9. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>47</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>48</b>
<b>POPIS SLIKA.....</b>	<b>50</b>

# 1. UVOD

Zbog svog negativnog utjecaja na ljudsko zdravlje i okoliš, emisije onečišćujućih tvari iz procesa izgaranja postale su glavna briga javnosti. Standardi za ograničavanje emisija komora izgaranja i tehnologije korištene za postizanje ovih granica dramatično su se promijenile u posljednjem desetljeću. Uz sve više komercijalnih zrakoplova koji svakodnevno putuju u različite dijelove svijeta, onečišćenje zraka koje oni uzrokuju je u porastu. Zabrinutost zbog utjecaja zrakoplovnih emisija na globalnu atmosferu motivirala je napredak u poboljšanju smanjenja emisije onečišćujućih tvari. Međutim, emisije NO<sub>x</sub> bilo je teško kontrolirati, a NO<sub>x</sub> se općenito emitira na razinama višim nego bilo koji drugi zagađivači. Cilj je završnog rada opisati princip rada komore izgaranja te štetno djelovanje dušičnih oksida na zdravlje i okoliš i načine smanjenja emisije onečišćujućih tvari. Naslov završnog rada je: Komore izgaranja zrakoplovnih mlaznih motora s niskom razinom onečišćenja dušičnim oksidima. Rad je podijeljen u devet cjelina:

1. Uvod
2. Klasična komora izgaranja mlaznih motora
3. Mehanizmi nastajanja štetnih spojeva u komori izgaranja
4. Utjecaj dušičnih oksida na okoliš i zdravlje
5. Regulatorna vezana za emisije zrakoplovnih mlaznih motora
6. Konstrukcijska rješenja komore za smanjenje onečišćenja
7. Daljnji razvoj komora s niskom razinom onečišćenja NO<sub>x</sub>
8. Pregled performansi komora izgaranja
9. Zaključak

U drugom poglavlju opisan je razvoj klasične komore izgaranja te princip rada i vrste komora izgaranja.

Mehanizmi nastajanja štetnih spojeva u komori izgaranja će biti objašnjeni u 3. poglavlju.

U četvrtom poglavlju opisan je štetni utjecaj dušičnih oksida na okoliš i zdravlje ljudi.

Peto poglavlje obuhvaća analizu regulatorne vezane za emisije zrakoplovnih mlaznih motora te njen nastanak i današnja djelovanja.



U šestom poglavlju objašnjena su konstrukcijska rješenja komore izgaranja sa smanjenom razinom onečišćenja i njihova uporaba.

Daljnje razvijanje komora s niskom razinom onečišćenja dušičnim oksidima je opisano u sedmom poglavlju.

Osmo poglavlje obuhvaća utjecaj performansi na dizajn komora izgaranja.

## 2. KLASIČNA KOMORA IZGARANJA MLAZNIH MOTORA

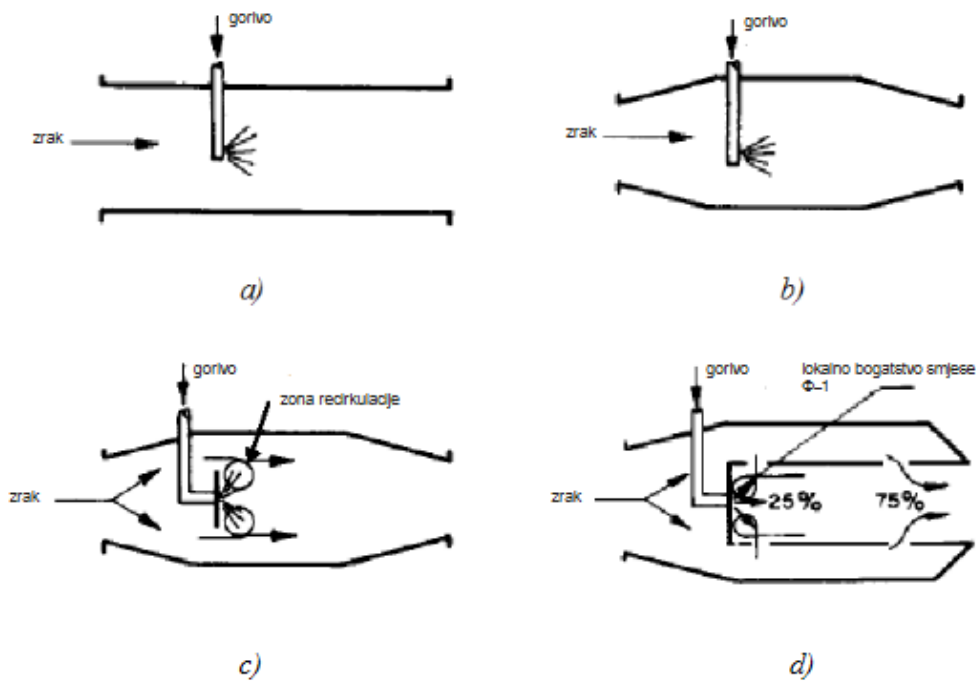
Komora izgaranja je jedan od glavnih dijelova zrakoplovnog mlaznog motora, a nalazi se između kompresora i turbine. U komori dolazi do izgaranja smjese goriva i zraka zbog čega se povećava temperatura radne smjese. Protok zraka iz kompresora podijeljen je na primarni i sekundarni. Primarni protok zraka se miješa s gorivom i sagorijeva u komori dok sekundarni struji oko komore kako bi smanjio temperaturu komore za izgaranje i produkata izgaranja koji dolaze na lopatice turbine [1].

Osnovni zahtjevi koje mora ispuniti komora izgaranja današnjih mlaznih motora su:

- Visoki koeficijenti iskoristivosti izgaranja
- Pouzdano i lako paljenje smjese na razini mora i na velikim visinama pri potrebi ponovnog pokretanja motora nakon gašenja
- Široko područje stabilnog izgaranja pri različitim tlakovima i bogatstvima smjese
- Mali gubitci tlaka
- Distribucija temperature na izlazu iz komore koja omogućava maksimalnu trajnost lopatica turbine
- Niska razina štetnih plinova i dimnosti
- Odsustvo pulzacije tlaka
- Oblik prilagođen konstrukciji motora
- Konstrukcija prihvatljive cijene, lake izrade pogona za održavanje
- Trajnost
- Višegorivna svojstva [1]

### 2.1. RAZVOJ KLASIČNE KOMORE IZGARANJA

Geneza nastanka današnje konstrukcije klasične komore izgaranja za mlazne motore prikazana je na slici 1.

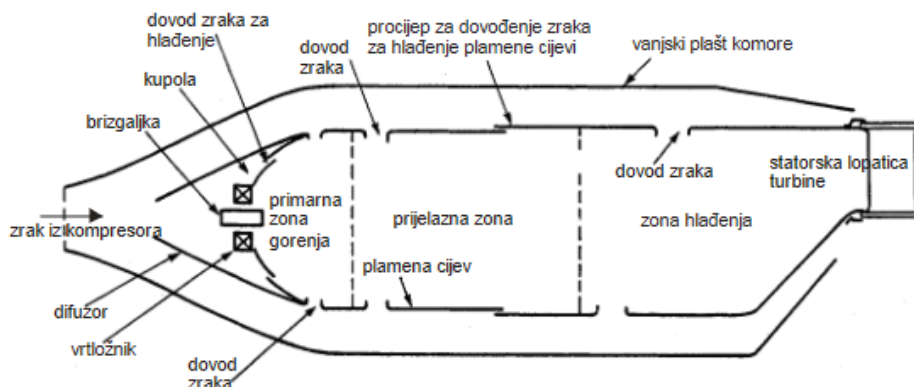


**Slika 1.** Geneza nastanka konstrukcije klasične komore izgaranja, [2]

Kako je prikazano na slici 1.a), komora bi mogla izgledati kao cijev između kompresora i turbine, ali je ta geometrija neprikladna zbog velike brzine zraka koja dolazi u prostor izgaranja iz kompresora te uzrokuje veliki gubitak totalnog tlaka zbog izgaranja i nemoguće je ostvariti stabilno izgaranje jer je ta brzina veća od brzine prostiranja fronta plamena te bi se on otpuhao. Na slici 1.b) postavljen je difuzor koji služi kako bi smanjio brzinu zraka za 5 puta, no to je još uvijek velika brzina za stabilno izgaranje te se postavlja stabilizator plamena iza kojeg se formira zona nižeg tlaka i povratno strujanje produkata izgaranja. U toj zoni povratnog strujanja produkti izgaranja dovode toplinu nadolazećoj smjesi goriva i zraka i zapaljuju je čime se održava stabilno izgaranje kako je prikazano na slici 1.c). Kako bi se održalo stabilno izgaranje, miješanje zraka i goriva mora biti blizu stehiometrijskog te je temperatura 2000K ili više. Slika 1.d) prikazuje da se na lopatice turbine dovodi ispušni plin ohlađen na 1850K uz pomoć postavljene plamene cijevi koja dovodi zrak za ohlađivanje produkata izgaranja te se istovremeno omogućava izgaranje sa smjesom u granicama upaljivosti [2].

## 2.2. PRINCIP RADA KLASIČNE KOMORE IZGARANJA

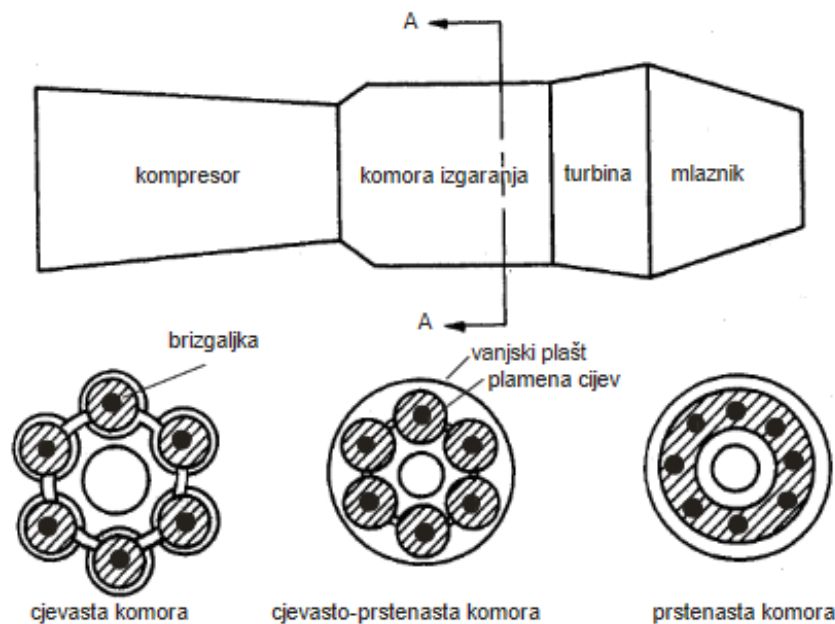
Komora za izgaranje podijeljena je u tri zone: primarnu zonu, prijelaznu zonu i zonu miješanja. Osnovna funkcija primarne zone je osigurati kontinuirano izgaranje te osigurati dovoljno vremena, dovoljnu temperaturu i turbulenciju kako bi se osiguralo isparavanje raspršenog goriva i potpunije izgaranje smjese goriva i zraka. Za sve vrste komora za izgaranje zajedničko je da se u primarnoj zoni kreira toroidalno povratno strujanje koje uvodi i recirkulira dijelove vrućih produkata izgaranja kako bi se osiguralo kontinuirano paljenje i izgaranje dolaznog zraka i goriva. Taj povratni tok postiže se na različite načine: pregradom-kupolom s otvorima na prednjoj kupoli plamene cijevi, vrtložnim lopaticama i radijalnim uvođenjem zraka kroz otvore na plamenoj cijevi. Od zraka koji se dovodi u komoru za izgaranje, samo oko 20-30% se dovodi u primarnu zonu izgaranja te u toj zoni smjesa je približno stehiometrijska. Kako bi se osiguralo da se smjesa zapali i izgori dovoljnom brzinom, sastav smjese mora biti unutar granica zapaljivosti. Vrtlog u primarnoj zoni ubrzava i potiče difuzno miješanje, a brzina izgaranja ovisi od integriteta raspršivanja, miješanja i sastava smjese te od lokalne turbulencije i lokalnih temperatura. Svrha prijelazne zone je da se omogući plinovima dovoljno vremena za oksidaciju, a da temperatura naglo ne padne jer u primarnoj zoni temperatura je veća od 2000K, a zbog disocijacije će nastati velika količina CO i H<sub>2</sub> te ako bi se ti plinovi naglo ohladili dovođenjem veće količine zraka tada bi se zamrznuli. U zoni miješanja proizvodi se mješavina zraka i plinova izgaranja kako bi se postigla raspodjela temperature prikladna za lopatice turbine. Na slici 2. je prikazana klasična komora za izgaranje i njeni dijelovi [2].



Slika 2. Klasična komora za izgaranje, [2]

## 2.3. VRSTE KOMORA IZGARANJA

Cjelokupni dizajn motora i nužnost što je moguće učinkovitijeg korištenja raspoloživog prostora utječu na izbor vrste i izgled komore izgaranja. Cjevasta i prstenasta komora izgaranja su dva osnovna oblika, a kompromis između njih je cjevasto-prstenasta komora izgaranja. Slika 3. prikazuje tri različite vrste komora izgaranja.



Slika 3. Vrste komora izgaranja, [2]

Cjevaste komore izgaranja korištene su u većini ranih mlaznih motora, a njihova glavna prednost je ta što je potrebno vrlo malo novca i vremena za razvoj. Međutim, zbog svoje znatne duljine i težine, nisu više prikladni za uporabu u zrakoplovnim motorima te se umjesto toga koriste u industrijskim jedinicama gdje je prednost lako održavanje jer se svaka komora može posebno odvojiti i zamijeniti ako dođe do oštećenja. Prstenaste komore izgaranja u potpunosti koriste prostor između kompresora i turbine, uz minimalni gubitak tlaka te najmanje troše zraka za hlađenje i imaju najbolji stupanj iskoristivosti. Stoga se danas najviše koriste u zrakoplovnim mlaznim motorima, a najveća im je mana što se pri kvaru ili oštećenju moraju kompletno mijenjati. Cjevasto-prstenasta komora pokušava spojiti kompaktnost prstenaste komore s mehaničkom čvrstoćom cjevaste komore te su najkorišteniji tip jer individualne komore za izgaranje su povezane na način da dijele sekundarni zrak, a primarni zrak za izgaranje ide u zasebnim komorama [2].

### 3. MEHANIZMI NASTAJANJA ŠTETNIH SPOJEVA U KOMORI IZGARANJA

Sastav smjese opisuje se faktorom bogatstva smjese  $\lambda$  i definira se kao:

$$\lambda = \frac{A/F}{A_0}$$

gdje:

- $A/F$  predstavlja stvarnu količinu zraka dovedenu po 1kg potrošenog goriva,
- $A_0$  predstavlja stehiometrijsku količinu zraka za izgaranje 1kg goriva.

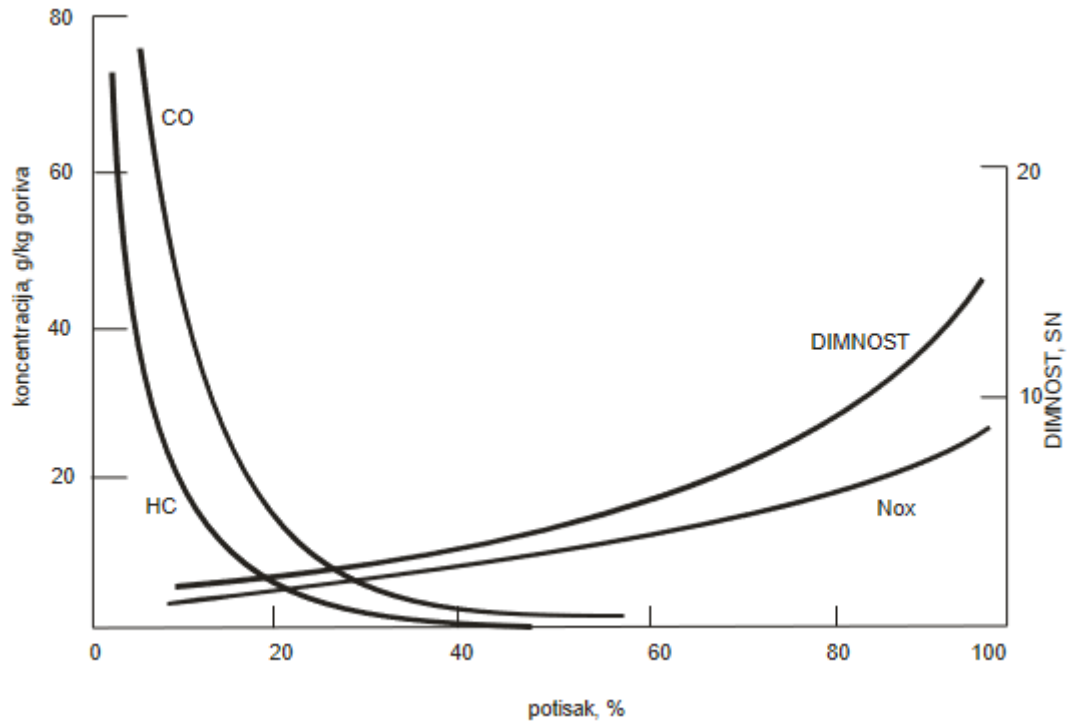
Ako je  $\lambda < 1$  smjesa je bogata, ako je  $\lambda > 1$  smjesa je siromašna te za stehiometrijsku smjesu vrijedi  $\lambda = 1$ .

Također, kvaliteta smjese se može opisati i faktorom zraka  $\Phi$  koji se definira kao:

$$\Phi = \frac{1}{\lambda}$$

Smjesa je bogata ako je  $\Phi > 1$ , ako je  $\Phi < 1$  smjesa je siromašna te ako je  $\Phi = 1$  smjesa je stehiometrijska [2].

Štetni spojevi koji se kontroliraju prema ICAO Annexu 16 su dušični oksidi –  $\text{NO}_x$ , ugljični monoksid –  $\text{CO}$ , nesagorjeli ugljikovodici –  $\text{UHC}$  i dimnost. Kako bi pronašli način za smanjenje razine onečišćenja uzrokovanih ovim štetnim spojevima, potrebno je znati mehanizam njihovog nastanka te režime rada motora u kojima su te koncentracije kritične. Konvencionalna komora izgaranja pod malim opterećenjem će proizvoditi veće koncentracije ugljičnog monoksida i nesagorjelih ugljikovodika te kako se opterećenje povećava, njihova koncentracija postupno će se smanjivati. Nasuprot tome, dušični oksidi i dimnost prilično su beznačajni pri malim opterećenjima, a pri većim opterećenjima postižu svoje maksimalne vrijednosti što je prikazano na slici 4. [1].



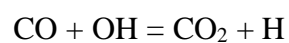
**Slika 4.** Utjecaj opterećenja motora na koncentracije štetnih ispušnih plinova, [2]

### 3.1. NASTAJANJE UGLJIČNOGA MONOKSIDA

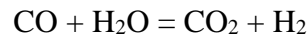
Izgaranje goriva se odvija s visokim prosječnim vrijednostima  $\lambda$  (siromašna smjesa) te je ugljični monoksid produkt nepotpunog izgaranja čiji uzrok može biti:

- prebogata smjesa ili prekratko vrijeme izgaranja u primarnoj zoni komore izgaranja,
- neadekvatno miješanje goriva i zraka zbog čega nastaju zone prebogate smjese,
- hlađenje produkata izgaranja, posebno u primarnoj zoni uvlačenjem zraka za hlađenje

U načelu bi trebalo biti moguće smanjiti koncentraciju CO koji se stvara u primarnoj zoni komore izgaranja na vrlo nisku razinu postupnim dovođenjem kisika odnosno hlađenjem. Međutim, nakon što se formira, CO je relativno otporan na oksidaciju. Na visokim temperaturama glavna reakcija uklanjanja CO je oksidacija CO:

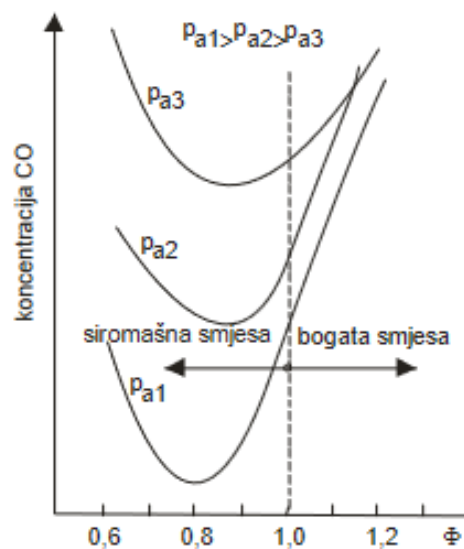


a na nižim temperaturama:



Glavni čimbenici koji utječu na količinu CO su:

1. Pretičak zraka u primarnoj zoni komore izgaranja
2. Tlak u komori izgaranja
3. Ulazna temperatura zraka u komori izgaranja
4. Prosječni promjer kapljica ubrizganog goriva



**Slika 5.** Utjecaj sastava smjese i ulaznog tlaka zraka na koncentraciju CO, [2]

Na dijagramu je prikazano da koncentracija CO smanjuje se s povećanjem  $\Phi$ , a da je minimalna vrijednost u području od oko  $\Phi=0,8$ . Međutim, povećanje  $\Phi$  ima za posljedicu povećanje koncentracije CO. Posljedica usporavanja oksidacije zbog smanjene temperature izgaranja je visoka koncentracija CO u području niskih  $\Phi$ . Povećanjem  $\Phi$ , povećava se temperatura izgaranja te ubrzava se brzina oksidacije čime se smanjuje koncentracija CO, ali na temperaturama većim od 1800K nastajanje CO postaje značajno zbog početka disocijacije  $\text{CO}_2$  [1], [4].



## 3.2. NASTAJANJE NESAGORJELIH UGLJIKOVODIKA

UHC uključuje gorivo koje napušta komoru izgaranja u obliku kapljica goriva ili para goriva ili u obliku produkata termičke degradacije goriva. Povezani su sa neadekvatnim raspršivanjem goriva, neodgovarajućom brzinom izgaranja, efektom hlađenja od zraka koji hladi stijenku komore ili kombinacijom navedenih efekata. Iako je kinetika stvaranja UHC-a složenija od kinetike stvaranja CO, općenito se utvrđuje da oni čimbenici koji utječu na stvaranje CO, utječu i na stvaranje UHC-a na gotovo isti način [1].

## 3.3. NASTAJANJE DIMNOSTI

Sitne čestice čađi koje su uzrok dimnosti ispušnih plinova, sastoje se uglavnom od ugljika koji je nastao izdvajanjem čvrstog ugljika – koksnih čestica u procesu izgaranja u zonama s velikim nedostatkom kisika. Njihovo nastajanje se ne može predvidjeti kinetičkim i termodinamičkim proračunima jer ovisi od procesa raspršivanja i atomizacije goriva te spravljanja smjese goriva i zraka. Mjerljivi čimbenici koji utječu na dimnost su utjecaj tlaka, kvaliteta goriva i kvaliteta raspršivanja [1].

### 3.3.1. Utjecaj tlaka zraka

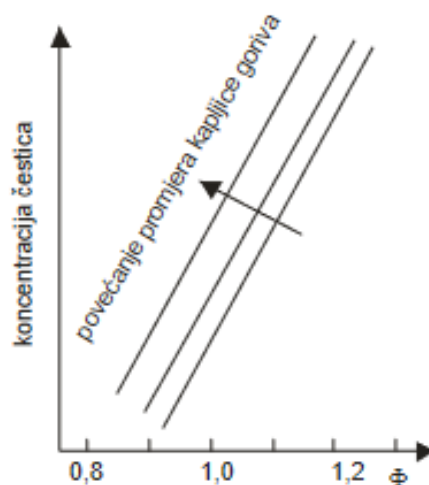
Utvrđeno je da kod prethodno pripremljene smjese goriva i zraka, čestice čađe se ne formiraju na tlakovima ispod 0.6MPa te kad je smjesa sastava  $\Phi < 1.3$ . Također, homogena smjesa ne producira izgaranje s uočljivim česticama čađi. Povećani tlak zraka ima najveći utjecaj na smanjenje raspona mlaza ubrizganog goriva. Pri nižem tlaku, mlaz goriva proteže se kroz cijelu zonu izgaranja, dok se pri većem tlaku raspršene kapljice goriva koncentriraju u području bliže injektoru, pogodnom za stvaranje čestica. Još jedan negativan učinak je da povećani tlak goriva smanjuje kut konusa mlaza goriva. To povećava vjerojatnost stvaranja čestica čađe, djelomično zbog povećanja promjera kapljica, a uglavnom zbog povećane količine smjese u područjima gdje se mogu stvoriti čestice čađe [1].

### 3.3.2. Utjecaj vrste goriva

Gorivo utječe na nastanak dimnosti na dva načina: kemijskim sastavom goriva i fizikalnim svojstvima goriva. Najvažnija fizikalna svojstva su viskoznost i isparivost te utječu izravno na promjer kapljica goriva, raspon ubrizgavanja goriva i brzinu isparavanja kapljica goriva. Mlazna goriva se provjeravaju na točki dimljenja, a to je maksimalna visina plamena u milimetrima kod koje gorivo može izgarati bez čađenja u standardnoj svjetiljci [1].

### 3.3.3. Utjecaj kvalitete raspršivanja goriva

Manji promjer kapljica raspršenog goriva smanjit će pojavu dimnosti. Manja kapljica goriva može potpuno ispariti, a zatim početi gorjeti kao para, naprotiv, gorjet će u režimu bogate smjese i difuzijskog izgaranja. Međutim, ako poboljšanje disperzije goriva ide na račun smanjenja dometa mlaza goriva, pojava dimnosti može se povećati zbog povećanja lokalne koncentracije goriva (slika 6.). Općenito, smanjenje raspona ubrizgavanja goriva obično je uzrok povećanja dimnosti kod motora s visokim stupnjem povećanja tlaka i koji je opremljen sa duplex brizgaljkama [1].



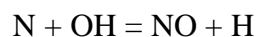
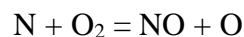
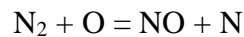
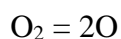
Slika 6. Utjecaj kvalitete raspršivanja na formiranje čestica čađi, [2]

## 3.4. NASTAJANJE DUŠIČNIH OKSIDA

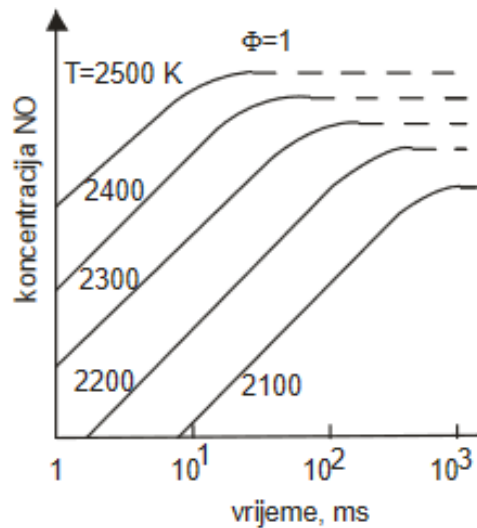
U elementarnom stanju dušik je glavna komponenta Zemljine atmosfere te diatomni molekularni dušik ( $N_2$ ) čini 78% zraka koji udišemo. Na običnim temperaturama, molekularni dušik je inertan zbog snažne trojne veze u molekuli. NO i  $NO_2$  oksidi, koji se zajedno nazivaju  $NO_x$  spojevi, nastaju kao produkti izgaranja u ispušnim plinovima. Tijekom procesa izgaranja spojevi  $NO_x$  mogu se proizvesti na četiri različita načina: kao termički  $NO_x$ , kao promptni  $NO_x$ , kao gorivni  $NO_x$  i kao oksidacija dušika [1], [3].

### 3.4.1. Termički $NO_x$

U procesu izgaranja ili postplamenima procesima izgaranja, termički  $NO_x$  produkt je oksidacije atmosferskog dušika pri visokim temperaturama koje su veće od 1850K. Mehanizam nastajanja NO spoja:



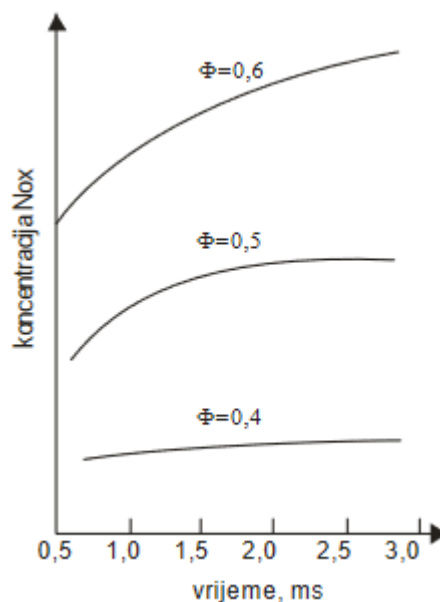
Spojevi NO dosežu svoju najveću vrijednost na strani siromašne kvalitete smjese te je to zbog borbe za kisikom između goriva i dušika. Zbog veće temperature izgaranja na strani bogate kvalitete smjese, dostupni kisik u tim se uvjetima uglavnom veže s molekulama goriva. Značajan utjecaj temperature izgaranja na termičku vrijednost NO prikazan je na slici 7.



**Slika 7.** Utjecaj temperature i vremena reakcije na koncentraciju  $\text{NO}_x$ , [2]

Kad se temperatura izgaranja smanji, koncentracija NO naglo pada, osobito kada je dostupno vrijeme izgaranja oko 5ms.

Slika 8. prikazuje učinak sastava smjese u slučaju tzv. prethodnog miješanja zraka i goriva (*premixed air-fuel system*) na formiranje  $\text{NO}_x$  spojeva. Što je duže vrijeme reakcije, veća je količina  $\text{NO}_x$  spojeva, osim ako je sastav smjese oko  $\Phi \approx 0,4$ . Tada vrijeme reakcije nema utjecaja na količinu  $\text{NO}_x$  spojeva te ta spoznaja ima značajan utjecaj na razvoj konstrukcije komore izgaranja s niskim razinama  $\text{NO}_x$  spojeva [1], [3].

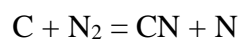
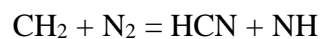
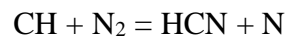


**Slika 8.** Utjecaj vremena reakcije i sastava smjese na formiranje  $\text{NO}_x$ , [2]

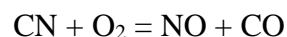
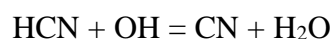
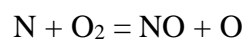
Ukratko, termički NO<sub>x</sub> spojevi mogu se značajno kontrolirati temperaturom izgaranja, odnosno temperaturom plamena, samo mala količina NO<sub>x</sub> spojeva nastaje na temperaturama ispod oko 1850K, pod tipičnim uvjetima za izgaranje u konvencionalnim komorama izgaranja NO<sub>x</sub> se linearno raste s vremenom reakcije te za vrlo siromašne smjese  $\Phi < 0,5$  i prethodno izmješane smjese goriva i zraka formiranje NO<sub>x</sub> spojeva ne ovisi značajno od vremena u zoni reakcije.

### 3.4.2. Promptni NO<sub>x</sub>

Promptni NO<sub>x</sub> nastaje kao produkt reakcije molekularnog dušika i radikala ugljikovodika nastalih u plamenu. Promptni mehanizam javlja se pri niskim temperaturama, kratkom vremenu zadržavanja i kod bogatih smjesa. Aktivacijska energija ovih reakcija je vrlo mala jer se reakcije odvijaju brzo radije u predplamenom području nego u plamenom ili postplamenom. Nakon toga, pod određenim uvjetima, HCN se oksidira u NO. U bogatim smjesama s nižom temperaturom plamena i bržim protokom zraka kroz komoru za izgaranje, sadržaj NO<sub>x</sub> može biti visok, iako promptni NO<sub>x</sub> ne sudjeluje značajno u emisijama NO<sub>x</sub> pri izgaranju ugljena i biomase. Nastajnje promptnog NO<sub>x</sub> se odvija prema [1] [3]:



Rezultat ovih reakcija je lako oksidiranje do NO u plamenu:



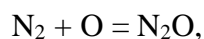
### 3.4.3. Gorivni NO<sub>x</sub>

Glavni izvor emisija NO<sub>x</sub> iz goriva koja sadrže dušik je pretvorba dušika vezanog za gorivo u NO<sub>x</sub> tijekom izgaranja. Dušik koji se nalazi u gorivu obično je vezan za gorivo kao dio organskih spojeva. Tijekom sagorijevanja dušik se oslobađa kao slobodni radikal da bi konačno formirao NO ili N<sub>2</sub>. Iako je glavni faktor u emisijama NO<sub>x</sub>, samo 20 do 30% dušika vezanog za gorivo pretvara se u NO. Većina stvaranja NO<sub>x</sub> iz dušika vezanog za gorivo događa se putem dva načina. Prvi način uključuje oksidaciju hlapljivih vrsta dušika tijekom početne faze izgaranja. Tijekom otpuštanja i prije oksidacije hlapljivih spojeva, dušik reagira i tvori nekoliko međuspojeva u području plamena bogatom gorivom. Ti se međuproducti zatim oksidiraju u NO ili reduciraju u N<sub>2</sub> u zoni nakon izgaranja. Stvaranje NO ili N<sub>2</sub> jako ovisi o lokalnom stehiometrijskom omjeru gorivo – zrak. Procjenjuje se da je ovaj hlapljivi mehanizam oslobađanja odgovoran za 60 do 90% gorivnog NO<sub>x</sub>-a. Drugi način uključuje oslobađanje dušikovih radikala tijekom izgaranja ugljične frakcije goriva. Ove se reakcije događaju mnogo sporije od reakcija koje uključuju hlapljive vrste.

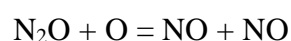
Pretvorba dušika vezanog za gorivo u NO<sub>x</sub> jako ovisi o stehiometriji goriva i zraka, ali je relativno neovisna o promjenama temperature zone izgaranja. Stoga se ova pretvorba može kontrolirati smanjenjem dostupnosti kisika tijekom početnih faza izgaranja. Tehnike poput kontroliranog miješanja goriva i zraka i postupnog izgaranja osiguravaju značajno smanjenje emisije NO<sub>x</sub> kontroliranjem stehiometrije [1], [3].

### 3.4.4. Oksidacija dušika

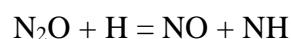
Događa se kada temperatura izgaranja se smanji i tlak poveća, a temperatura reakcije je manja od 1500K te nastaje dušikov oksid [1]:

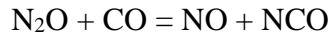


zatim slijedi formiranje NO prema:



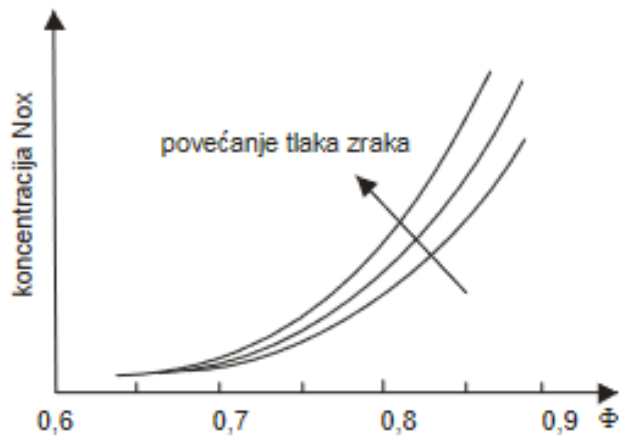
moguće su i sljedeće reakcije:





### 3.4.5. Utjecaj tlaka na formiranje $\text{NO}_x$ spojeva

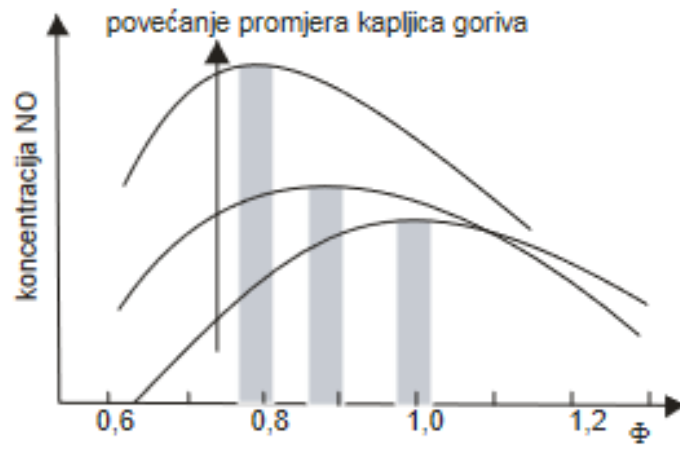
Što je veći stupanj povećanja tlaka (*Pressure ratio*) toplinski stupanj iskoristivosti plinske turbine je veći, zbog toga se stupanj povećanja tlaka stalno povećava, a time i tlak u komori izgaranja. Stupanj povećanja tlaka sadašnjih visoko obtočnih mlaznih motora iznosi od 30 do 50. Za konvencionalne komore za izgaranje potvrđeno je da je prema  $p^n$  količina  $\text{NO}_x$  proporcionalna povećanju tlaka, a raspon  $n$  je  $n = 0.5 \dots 0.8$ . Na slici 9. može se vidjeti da u prethodno izmješanoj siromašnoj smjesi tlak zraka nema utjecaja na stvaranje  $\text{NO}_x$  [1].



Slika 9. Utjecaj sastava smjese i tlaka zraka na formiranje  $\text{NO}_x$ , [2]

### 3.4.6. Utjecaj raspršivanja goriva na formiranje $\text{NO}_x$ spojeva

Eksperimenti su pokazali da će se povećanjem prosječnog promjera kapljica ubrizganog goriva povećati i količina  $\text{NO}_x$  spojeva, što je izraženije u siromašnim smjesama, slika 10. [2].



**Slika 10.** Utjecaj prosječne vrijednosti promjera kapljica goriva na formiranje  $\text{NO}_x$ , [2]



## 4. UTJECAJ DUŠIČNIH OKSIDA NA OKOLIŠ I ZDRAVLJE

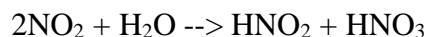
Dušični oksidi se nalaze u atmosferi i imaju veliki utjecaj na sastav troposfere i stratosfere te imaju važnu ulogu u procesu stvaranja i uništavanja ozona. Pojavljuju se u obliku tri kemijska spoja:  $N_2O$ ,  $NO$  i  $NO_2$ . Spojevi  $NO$  i  $NO_2$  predstavljeni su zajedničkim imenom  $NO_x$ . Većina  $NO_x$  koja je emitirana u atmosferu je u obliku  $NO$  koji oksidacijom prelazi u  $NO_2$ , no unatoč maloj količini zastupljenosti u atmosferi, utjecaj na okoliš i zdravlje je značajan.

Prilikom pokušaja smanjenja ispuštanja  $CO$ ,  $HC$  i  $C$  došlo je do porasta ispuštanja  $NO_x$  koji je od njih najštetniji i najopasniji te doprinosi nastanku kiselih kiša, fotokemijskog smoga i stvaranju ozona u troposferi.

### 4.1. KISELA KIŠA

Kisela kiša je padalina zagađena sumporovim dioksidom, dušičnim oksidima, amonijakom i drugim kemijskim spojevima. Vrijednost pH je u prosjeku od 4 do 4,5 te je to oko 40 puta veća količina kiselina u usporedbi sa običnom kišom. Dušični oksidi nastaju tijekom izgaranja goriva kao spoj dušika iz zraka i kisika te što je veća temperatura izgaranja brže dolazi do njihovog nastajanja. Prilikom procesa izgaranja prvo se oslobađa dušikov monoksid koji u zraku oksidira u štetni dušikov dioksid te se u reakciji s vlagom stvara dušična kiselina koja je odgovorna za trećinu nastanka kiselih kiša.

Proces kako iz dušik-oksida u reakciji s vodom nastaju nitritna ( $HNO_2$ ) i dušična ( $HNO_3$ ) kiselina:



Ako je velika koncentracija dušikovog dioksida u zraku dolazi do akutnih oboljenja dišnih organa te do pojave simptoma kao što su: glavobolja, nesаница i čirevi sluznice.

Također, posljedice djelovanja kiselih kiša su: kiseli oceani, problemi pitke vode, izumiranje šuma te štetno djelovanje na biljke, jezera i građevine [5].

## 4.2. FOTOKEMIJSKI SMOG

Fotokemijski smog je miješavina primarnih i sekundarnih onečišćivača do čije pojave dolazi kada primarni onečišćivači koji se većinom sastoje od dušičnih oksida, i hlapljivi organski spojevi budu izloženi sunčevom zračenju. Glavni izvor tih onečišćivača je izgaranje goriva te je bitno razdoblje dana jer kako zračenje Sunca postaje intenzivnije prema sredini dana, NO<sub>2</sub> se troši u fotokemijskim reakcijama stvarajući ozon čija koncentracija raste. Ozon dalje reagira s ostalim onečišćivačima stvarajući čitav niz organskih spojeva i radikala koji čine fotokemijski smog. Taj način pretvara polutante u sitne kapljice tekućine koje ostaju lebdjeti u atmosferi te se na njima Sunčeve i UV-zrake odbijaju ili lome te su vidljive u obliku bjelkaste izmaglice, a nebo postaje bijele boje i Sunce jedva nazire dok se UV-zrake emitiraju u obliku infracrvenog zračenja (slika 11.) [6].

Posljedice fotosmoga na okoliš je porast temperature zbog prekomjernog nakupljanja stakleničkih plinova, sprječavanje stvaranja oblaka s oborinama, onečišćenje zraka što smanjuje vidljivost te negativan utjecaj na biljke i životinje jer sunčeva svjetlost ne dopire.

Posljedice na zdravlje su: upale dišnih puteva, kašalj, kratkoća daha, stezanje u prsima, pogoršavaju se respiratorni problemi poput astme, nastanak srčanih bolesti i njihovo pogoršavanje te izaziva stres, gubitak kvalitete života, pojave različitih vrsta raka i preranu smrt [6].



**Slika 11.** Fotokemijski smog, [6]

### 4.3. UTJECAJ NA ZDRAVLJE

Izloženost dušičnim oksidima može uzrokovati mnoge štetne učinke na zdravlje ljudi. Akutna izloženost može dovesti do nadraživanja očiju, nosa, grla, pluća te uzrokovati kašalj i poteškoće s disanjem, umor, mučninu i povraćanje. Zbog izloženosti većim količinama  $\text{NO}_x$ -a može doći do grčeva, oticanja grla i gornjih dišnih puteva te samim time i gušenja. Posljedice su i ozbiljne opekline kože i očiju, a pri visokim koncentracijama može oštetiti i zube. Dugotrajna izloženost može uzrokovati astmu, trajno oštećenje pluća, srca i živčanog sustava te može izazvati genetička oštećenja i oštećenja kod fetusa u razvoju i smanjenje plodnosti[11].

## 5. REGULATIVA VEZANA ZA EMISIJE ZRAKOPLOVNIH MLAZNIH MOTORA

Prema ICAO-u (*International Civil Aviation Organization*) karakteristične razine plinskih emisija izmjerene tijekom ciklusa slijetanja i polijetanja ne smiju prelaziti sljedeće regulatorne granice koje su definirane odnosom:  $D_p/F_{oo}$  [1]:

$F_{oo}$  predstavlja najveću snagu/potisak dostupnu za polijetanje u normalnim operativnim uvjetima pri ISA na razini mora statičkim uvjetima bez uporabe ubrizgavanja vode kako je odobrilo tijelo za ovjeravanje. Potisak je izražen u kilonewtonima (kN).

$D_p$  je masa bilo kojeg plinovitog zagađivača ispuštenog tijekom referentnog ciklusa slijetanja i polijetanja. [2]

1. nesagorjeli ugljikovodici:  $D_p/F_{oo} = 19.6$
2. ugljični monoksid:  $D_p/F_{oo} = 118$
3. dušični oksidi:
  - a) Za motore tipa ili modela čiji je datum proizvodnje prvog pojedinačnog modela bio 31. prosinca 1995. ili prije, a za koje je datum proizvodnje pojedinog motora bio 31. prosinca 1999. ili prije toga:
$$D_p/F_{oo} = 40 + 2F_{oo}$$
  - b) Za motore tipa ili modela čiji je datum proizvodnje prvog pojedinačnog modela bio nakon 31. prosinca 1995. ili za koje je datum proizvodnje pojedinog motora bio nakon 31. prosinca 1999. godine:
$$D_p/F_{oo} = 32 + 1.6F_{oo}$$
  - c) Za motore tipa ili modela čiji je datum proizvodnje prvog pojedinačnog modela bio nakon 31. prosinca 2003. godine:
    - I. Za motore sa stupnjem povećanja tlaka (*Pressure ratio*) 30 ili manje:
      - i. Za motore s najvećim nazivnim potiskom većim od 89.0kN:
$$D_p/F_{oo} = 19 + 1.6F_{oo}$$
      - ii. Za motore s najvećim nazivnim potiskom većim od 26.7kN, ali ne većim od 89.0kN:
$$D_p/F_{oo} = 37.572 + 1.6F_{oo} - 0.2087F_{oo}$$

II. Za motore sa stupnjem povećanja tlaka većim od 30, ali manjim od 62.5:

i. Za motore s najvećim nazivnim potiskom većim od 89.0kN:

$$D_p/F_{00} = 7 + 2.0F_{00}$$

ii. Za motore s najvećim nazivnim potiskom većim od 26.7kN, ali ne većim od 89.0kN:

$$D_p/F_{00} = 42.71 + 1.4286F_{00} - 0.4013F_{00} + 0.00642F_{00} \times F_{00}$$

III. Za motore sa stupnjem povećanja tlaka 62.5 ili većim:

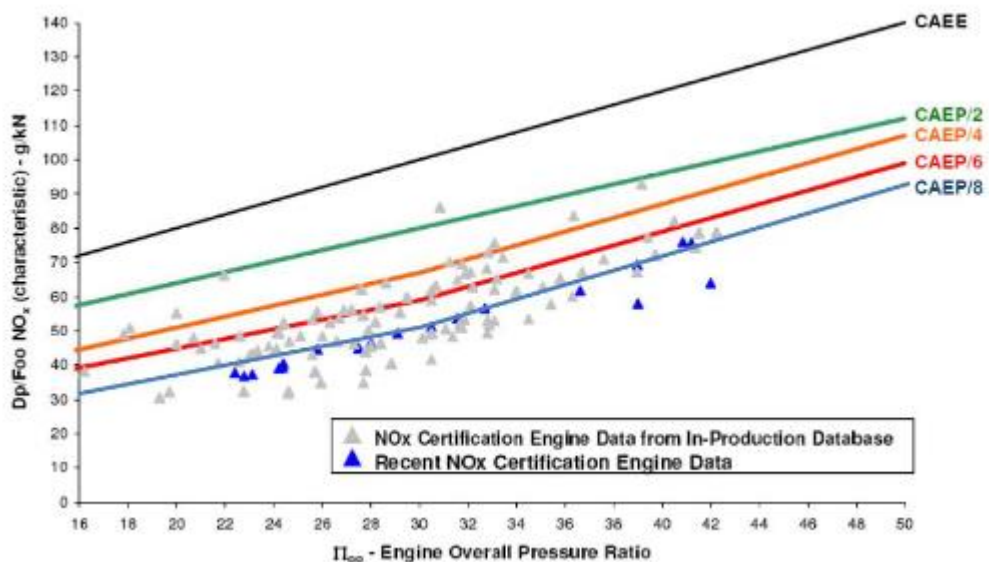
$$D_p/F_{00} = 32 + 1.6F_{00}$$

1970. godine Kongres SAD-a donio je "Zakon o čistom zraku" kao osnovu za kontrolu emisije motora zrakoplova, koji je promicao usvajanje zrakoplovnih propisa povezanih sa smanjenjem emisija u Sjedinjenim Državama na lokalnoj i državnoj razini. Osim toga, Kongres je osnovao agencije za donošenje i provedbu propisa. Konferencija Ujedinjenih naroda o zaštiti okoliša održana je u Stockholmu 1972. godine, a ICAO-ov akcijski plan zaštite okoliša formuliran je na temelju zaključaka konferencije. Kao dio akcijskog plana osnovana je "Istraživačka skupina" koja će definirati određene zadatke vezane uz emisije zrakoplovnih motora. Kao rezultat rada ove skupine, Međunarodna organizacija za civilno zrakoplovstvo formulirala je i izdala cirkular pod naslovom "Kontrola emisije zrakoplovnih motora" 1977. godine. Cirkular sadrži smjernice u obliku propisanih postupaka za kontrolu sadržaja proizvoda izgaranja turbo mlaznih i optočno-mlaznih motora namijenjenih za podzvučne zrakoplove. Kako bi se smanjile emisije zrakoplova, iste godine 1977. Osnovan je Odbor za emisije zrakoplovnih motora. Zadaća odbora je razviti posebne standarde koji ograničavaju sastav produkata izgaranja zrakoplovnih motora. Na drugom sastanku odbora u svibnju 1980. predložen je materijal koji bi se trebao uključiti u dokumente ICAO-a kao Annex. Nakon koordinacije s državama članicama ICAO-a uspostavljeno je da treba uključiti sve aspekte utjecaja zrakoplova na okoliš, odnosno buku i produkte izgaranja u jedan Annex. Stoga je 1981. izašao konačni dokument: postojeći Annex 16 preimenovan je u Svezak I i sadrži propise koji se odnose na buku zrakoplova, dok novi Svezak II sadrži propise koji se odnose na emisije motora zrakoplova. Detaljnije, Svezak II sadrži standarde koji zabranjuju namjerno ispuštanje sirovog goriva u atmosferu iz mlaznih motora proizvedenih nakon 18. veljače 1982. godine. Također, uključeni su i standardi koji ograničavaju emisije ugljičnog monoksida, ugljikovodika i dušičnih oksida [1].

Sadržaj Sveska II konstruiran je na sljedeći način: u 1. dijelu donose se osnovne definicije i opis simbola, u 2. dijelu ispušteno gorivo, a u 3. dijelu ograničenja za emisije mlaznih motora podzvučnih i nadzvučnih zrakoplova. Također, sadrži 6 dodataka u kojima su detaljno opisane procedure mjerenja i mjerne opreme, specifikacije goriva koje se koristi za ispitivanje te opis računskih metoda.

Odbor za zaštitu okoliša od zrakoplovnih djelovanja (*Committee on Aviation Environmental Protection - CAEP*) zadužen je za provođenje sadašnjih aktivnosti ICAO-a. Osnovan je na Vijeću ICAO-a 1983. godine i njime su ujedinjeni Odbor za buku i Odbor za emisije zrakoplovnih motora. Odbor se sastoji od članova i promatrača te sudjeluje u formuliranju nove politike i u prihvaćanju novih standarda u vezi s bukom zrakoplova i emisijama zrakoplovnih motora. Struktura odbora sastoji se od pet radnih grupa i grupe potpore. CAEP je zasad održao osam službenih sastanaka te ishod svakog sastanka je i izvještaj s posebnim preporukama koje predlažu Vijeću ICAO-a.

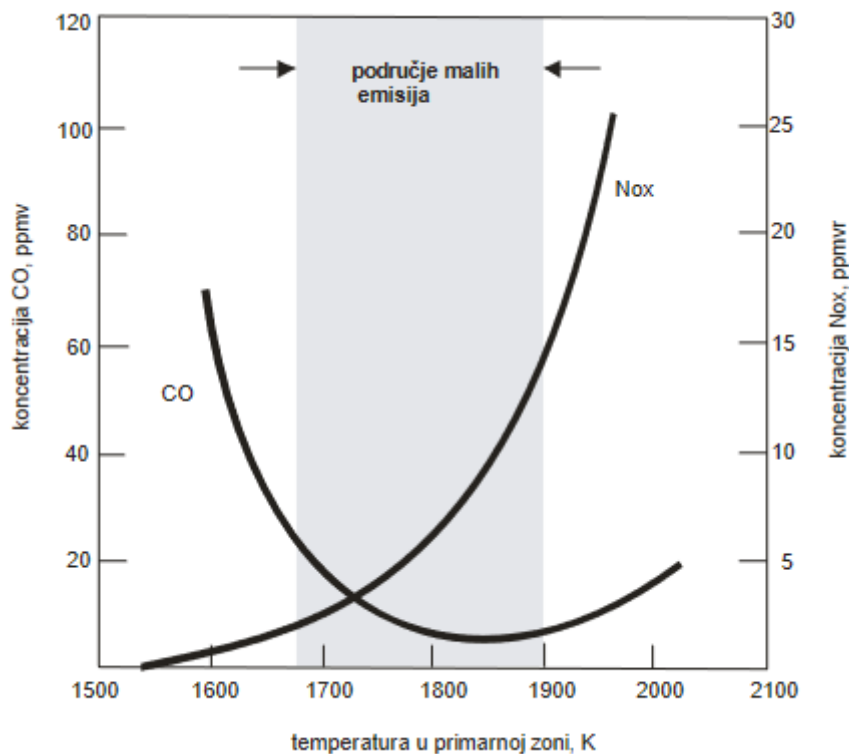
Na slici 12. su prikazani ICAO standardi za emisije  $\text{NO}_x$ -a te se iz dijagrama koji prikazuje udio  $\text{NO}_x$ -a u ovisnosti o stupnju povećanja tlaka motora, može vidjeti da je svaki sljedeći sastanak CAEP-a donio strože standarde [1].



Slika 12. ICAO standardi za emisije  $\text{NO}_x$ -a, [1]

## 6. KONSTRUKCIJSKA RJEŠENJA KOMORE ZA SMANJENJE ONEČIŠĆENJA

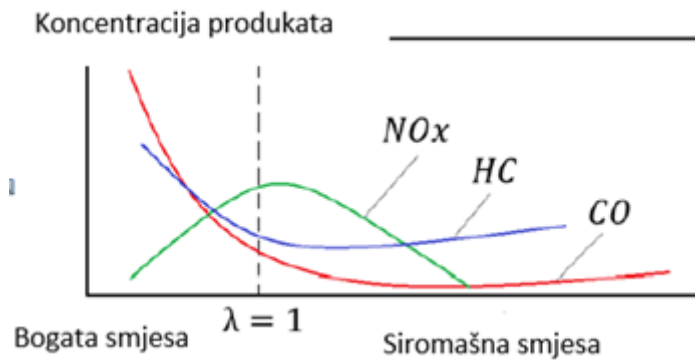
Od svih čimbenika koji utječu na emisije onečišćujućih tvari iz komore izgaranja, a posebno na  $\text{NO}_x$ , najvažnija je temperatura zone izgaranja. Utjecaj temperature izgaranja na stvaranje CO i  $\text{NO}_x$  prikazan je na slici 13.



**Slika 13.** Utjecaj temperature u primarnoj zoni komore izgaranja, [2]

Ova slika također prikazuje da se previše CO formira na temperaturama ispod oko 1670K, dok se prekomjerne količine  $\text{NO}_x$  proizvode na temperaturama višim od oko 1900K. Samo u prilično uskom rasponu temperatura između 1670 i 1900K nalaze se razine CO i  $\text{NO}_x$  ispod 25 odnosno 15ppmv [2], [7].

Zaključno se može prikazati i utjecaj bogatstva smjese na koncentraciju produkata CO, HC i  $\text{NO}_x$ , slika 14. Na slici se vidi da se s jako siromašnom smjesom mogu postići izrazito niske koncentracije, posebno  $\text{NO}_x$  i CO. Također, se vidi da i s bogatom smjesom se može postići niska koncentracija  $\text{NO}_x$ , ali tada imamo prilično visoke koncentracije ostalih komponenti.



**Slika 14.** Utjecaj bogatstva smjese na koncentraciju produkata izgaranja, [1]

Na početku razvoja mlaznih motora pa tako i na razvoj klasičnih komora izgaranja nije se poklanjala velika pažnja na efekte onečišćenja okoliša i utjecaja na zdravlje. Razvojem svijesti o štetnosti ispušnih plinova i razvojem regulative u tom području komore izgaranja podlježu sve strožijim zahtjevima u vezi onečišćenja atmosfere štetnim plinovima.

Koristeći se prethodno opisanim spoznajama o utjecaju pojedinih parametara na koncentracije štetnih komponenata, a posebno na  $NO_x$ , razvoj klasične komore izgaranja išao je u pravcu da se nađu konstrukcijska rješenja koja će stvarati uvjete za izgaranje koje će producirati niske koncentracije štetne komponente.

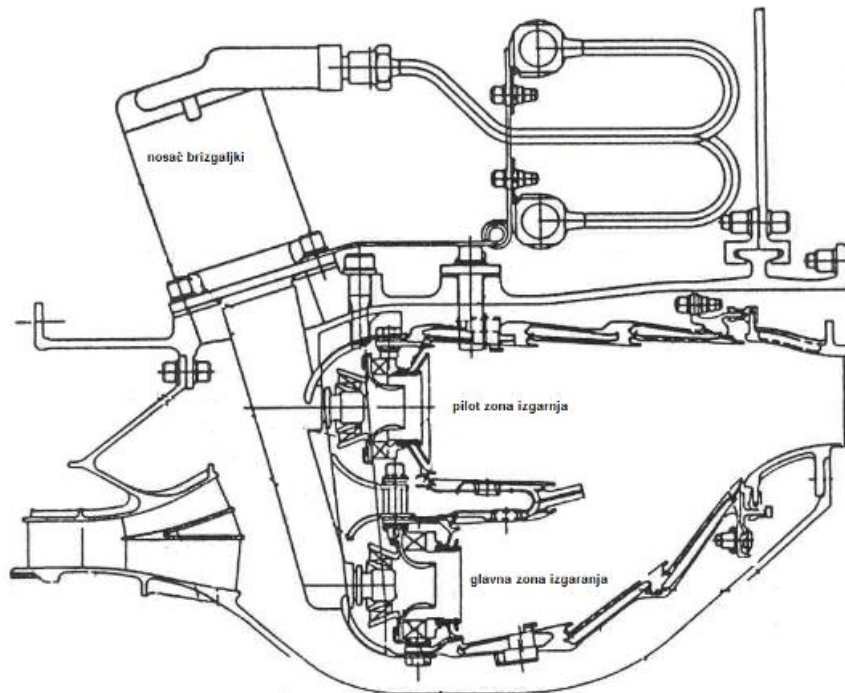
## 6.1. KOMORE S FAZNIM IZGARANJEM

Jedno od konstrukcijskih rješenja za smanjenje onečišćenja je fazno izgaranje, odnosno fazne komore. Tipična fazna komora ima blago opterećenu primarnu zonu koja osigurava sav porast temperature potreban za pogon motora pri uvjetima male snage. Izgaranje se odvija sa siromašnom smjesom od oko  $\Phi=0.8$ , kako bi se postigla visoka učinkovitost izgaranja i niske emisije CO i UHC. Pri većim postavkama snage, ova zona služi kao izvor izgaranja za glavnu zonu koja se opskrbljuje s potpuno izmiješanom smjesom goriva i zraka i u kojem je vrijeme reakcije kratko. Kada rade pri uvjetima najveće snage,  $\Phi$  u zonama izgaranja se održava vrlo niskom na oko 0.6, kako bi se minimalizirala pojava  $NO_x$ -a i dimnosti [1], [8], [9].

Važan izbor za dizajnera je treba li fazno izgaranje provesti u seriji ili paralelno. Paralelno fazno izgaranje odlikuje se upotrebom dvostruke prstenaste komore koja je



prikazana na slici 15. Te komore se još nazivaju i tzv. DAC (*Double Annular Combustor*) komore.



**Slika 15.** Dvostruka prstenasta komora, [1]

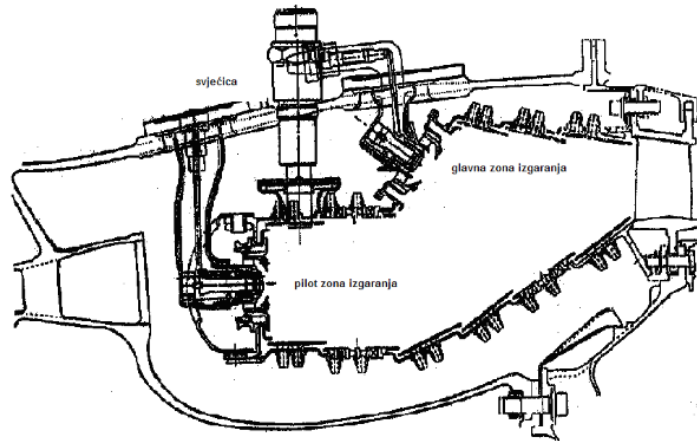
Za vrijeme pokretanja i na malim opterećenjima izgaranje se odvija u vanjskom prstenu, a na većim opterećenjima izgaranje se paralelno odvija i u glavnoj zoni.

Glavna prednost ove komore je to što omogućuje postizanje svih ciljeva učinkovitosti izgaranja, uključujući niske emisije te je približno iste duljine kao i konvencionalna komora. Također, brizgaljke se mogu postaviti na jednom nosaču, što omogućava jednostavno hlađenje glavne brizgaljke za vrijeme dok ona ne ubrizgava gorivo da se ne bi zapeklo gorivo u njoj.

Međutim ovaj tip komore ima i niz nedostataka. Jedan od glavnih nedostataka je što se sve zone opskrbljuju zrakom na izlaznoj temperaturi kompresora, što znači da sve zone imaju relativno istu nisku sklonost ka gašenju plamena. Veća površina plamene cijevi zahtijeva dodatni rashladni zrak, što negativno utječe na efikasnost. Nadalje, izlazni profil temperature pomaknut je radijalno te još ima problem na srednjim opterećenjima kad jedna i druga komora rade izvan svojih optimalnih projektnih točaka.

Kod serijski postavljene komore koje se još nazivaju i ASC (*Axial Staged Combustor*) komore (slika 16.) izgaranje na malim opterećenjima se odvija u pilot zoni, a pri većim

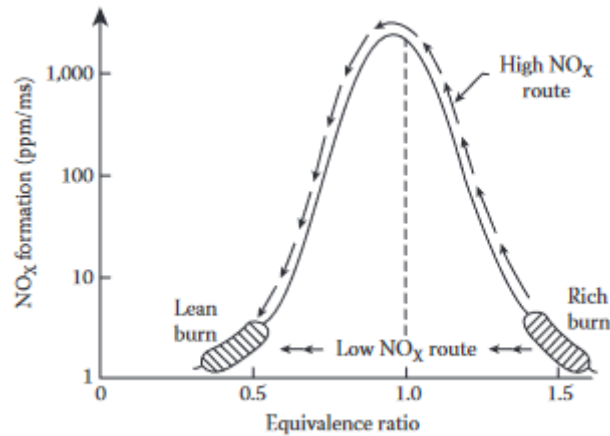
opterećenjima gorivo se dovodi u glavnu zonu serijski postavljenu iza pilot zone što omogućava dobru pripremu smjese i rad sa siromašnom smjesom koja izgara s malom koncentracijom NO<sub>x</sub> i malom dimnošću. Glavni nedostatak ove komore je što serijski postavljene komore stvaraju dodatnu duljinu, što otežava problem nadogradnje nekim motorima te potreba za dva nosača brizgaljki i problem s hlađenjem glavne brizgaljke [1], [8], [9].



Slika 16. Serijsko fazno izgaranje, [1]

## 6.2. RQL KOMORE

Princip rada RQL (*Rich-Burn, Quick-Quench, Lean-Burn Combustor*) komore pripada mehanizmu za kontrolu emisija pri izgaranju bogate smjese. Koncept je shematski prikazan na slici 17., gdje izgaranje započinje smjesa bogata gorivom u primarnoj zoni s  $\Phi = 1.2-1.8$ . Izgaranje s bogatom smjesom općenito ima dvostruku prednost. Prva prednost je to da zbog izgaranja s bogatom smjesom, koje proizvodi visoku koncentraciju vodika i ugljikovodičnih radikala, stabilnost izgaranja je poboljšana. Druga prednost je da zbog niskih temperatura plamena i niske koncentracije kisika, stvaranje NO<sub>x</sub>-a svedeno je na minimum.



**Slika 17.** Princip rada RQL komore, [8]

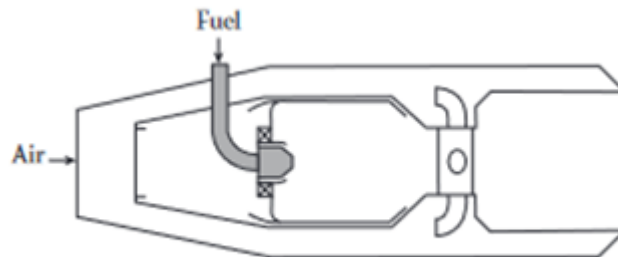
Vrući ispušni plin primarne zone sadrži znatnu količinu CO, UHC i dima, koji se ne može ispustiti bez dodatne obrade. Kao rezultat toga, nizvodno od bogate zone koristi se zona za osiromašenje smjese. Za oksidaciju međuprodukata CO, vodika i ugljikovodika, značajan dio protoka zraka za osiromašenje uvodi se u zonu za osiromašenje smjese. Dodavanje protoka zraka, s druge strane, može rezultirati faktorom zraka koji je blizu stehiometrijske vrijednosti, što dovodi do brzog stvaranja termičkog NO<sub>x</sub>-a. Kako bi se osigurala minimalna proizvodnja NO<sub>x</sub>, zrak se mora odmah pomiješati sa ispušnim plinom iz primarne zone, tako da se može prebaciti iz načina izgaranja s bogatom smjesom u način izgaranja sa siromašnom smjesom kako bi se smanjio razvoj termičkog NO<sub>x</sub>-a. Segment izgaranja sa siromašnom smjesom tada se koristi za daljnju potrošnju CO i UHC što rezultira znatnom proizvodnjom izgaranja CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>O u ispuhu na izlazu iz komore. Izgaranje sa siromašnom smjesom također je zaduženo za osiguravanje visoke kvalitete distribucije izlazne temperature iz komore izgaranja. Kod izgaranja sa siromašnom smjesom tipična vrijednost  $\Phi$  je između 0.5 i 0.7. Shema RQL komore izgaranja prikazana je na slici 18. [8], [9].



**Slika 18.** Model RQL komore izgaranja, [1]

### 6.2.1. Pregled RQL tehnologije

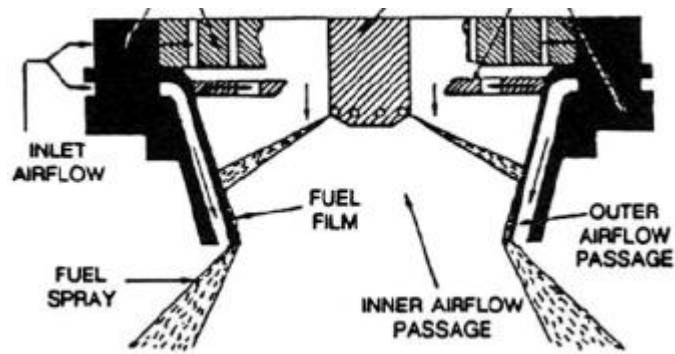
Kada se RQL tehnologija primjenjuje na konvencionalne komore, postoje dva značajna problema: prvi je s koliko bogatom smjesom treba osigurati izgaranje, a drugi je koliko se učinkovito osiromašenje može izvesti kroz standardni ulaz zraka mlaznicama za osiromašenje smjese (*Quick Mix Jet Air*, slika 19.).



**Slika 19.** Shema RQL komore izgaranja, [9]

Stvarne vrijednosti  $\text{NO}_x$  i ostalih štetnih komponenti produkata izgaranja uvelike ovise o učinkovitom miješanju goriva i zraka, odnosno o kvaliteti miješanja.

Komoru izgaranja pod nazivom TALON (*Technology for Advanced Low  $\text{NO}_x$* ) obitelji po modelu RQL tehnologije za plinskoturbinske motore komercijalnih zrakoplova razvila je tvrtka Pratt & Whitney. Najnovija komora izgaranja TALON X koristi vrstu brizgaljke (slika 20.) koja omogućava poboljšanje isparavanja, distribucije goriva i miješanja goriva i zraka. Brizgaljka se sastoji od mlaznice za gorivo i složenog radialnog vrtložnog dovodnika. Zrak se ubrizgava u dvije cijevi, jednu unutarnju i jednu vanjsku, gdje počinje snažno vrtloženje koje pomaže u brzom miješanju kapljica goriva. Kada se gorivo isparava na rubu raspršivača u sučelje između dva vrtložna zračna toka, raspršivanje se pojačava. Promjenom kutova vrtloženja dvaju vrtložnih prolaza zraka i međusobnog razdvajanja protoka zraka, može se promijeniti kut raspršivanja i aerodinamika primarne zone. GE (*General Electric*) tehnologija nazvana LEC (*Low Emissions Combustors*) razvila je različite konfiguracije vrtložnih čaša s optimiziranim udjelom zraka između primarnog, sekundarnog i ispušnog zraka namijenjenog za stvaranje jednolike smjese goriva i zraka, [8], [9].



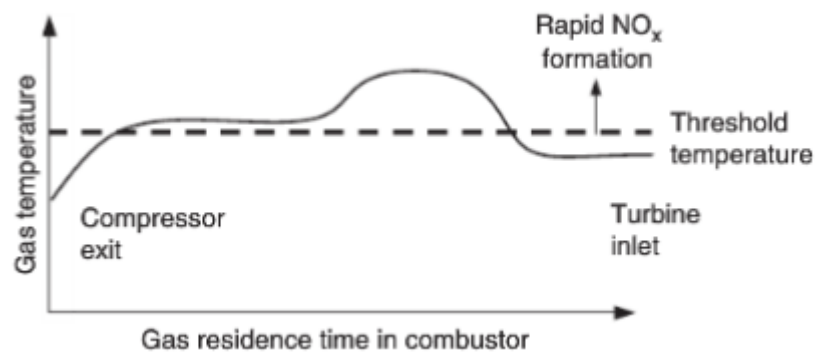
Slika 20. TALON X mlaznica, [8]

Kao što je prethodno navedeno, brzo miješanje bitno je za potpuno izgaranje bogate smjese koja izlazi iz primarne zone, a pritom proizvodi najmanju moguću količinu  $\text{NO}_x$ -a. Primjenjuju se tehnologije za poboljšanje učinkovitosti osiromašenja smjese na različite načine. One se mogu opisati na sljedeći način:

1. Bliži razmak između primarnog i mlaza za osiromašenje smjese: ova metoda uključuje pomicanje mjesta mlaznica za osiromašenje smjese bliže primarnim mlaznicama. Ima dvije prednosti: jedna je ta što poboljšava efikasnost miješanja za osiromašenje smjese s primarnim zrakom, a druga je ta što ubrzava prijelaz iz izgaranja s bogatom smjesom u izgaranje sa siromašnom smjesom. Ovu metodu koriste P&W u svojim TALON I i GE-ovim LEC komorama izgaranja.
2. Optimizacijom uzorka otvora mlaza, uključujući razmak, veličinu i geometriju: provedeno je nekoliko istraživanja kako bi se istražilo prodiranje mlaza, struktura i raspodjela polja protoka uzrokovanih miješanjem mlaza u poprečnim mlazovima. Pojedinačni i višestruki mlazovi, ograničeni i neograničeni, bili su predmet fokusiranog istraživanja. Nakon značajnog istraživanja geometrije mlaznih otvora predstavljena je metodologija projektiranja cilindričnih i pravokutnih konfiguracija za ograničeni protok kako bi se uspostavila odgovarajuća veličina mlaza sa zadanim omjerom impulsa i protoka. NASA je provela više eksperimenata protoka mlazova u poprečnom toku koji ne reagiraju kako bi se procijenile geometrijske značajke kao što su razmak mlazova, oblik i područje protoka. Optimalni broj mlazova određuje se kao rezultat istraživanja. Na temelju eksperimenata TALON X je nedavno razvio optimizirani jednorodni otvor za osiromašenje smjese s naglaskom na promjenu oboda i veličine.
3. Skraćeno vrijeme zadržavanja smjese u zoni osiromašenja smjese: sa povećanjem vremena zadržavanja protoka povećava se proizvodnja  $\text{NO}_x$ . Dok plin putuje od izgaranja s bogatom smjesom do izgaranja sa siromašnom smjesom, postoji područje u kojem je

neizbježno brzo stvaranje  $\text{NO}_x$ -a. Vrlo je važno da smjesa provede što manje vremena u tim područjima. Ovu strategiju koristi TALON X, a ostvaruje se optimizacijom volumena i raspodjele prostora komore izgaranja u funkciji duljine. U usporedbi s prethodnim TALON-om koji se koristio u motoru PW4098, rezultirajuće vrijeme zadržavanja za TALON X smanjeno je dva puta, a popratni indeks emisije  $\text{NO}_x$  tijekom polijetanja smanjen je za tri puta. Ova je metoda također učinkovito optimizirana u tehnologiji izgaranja pete faze tvrtke Rolls-Royce.

4. Dodavanje lokalnog rashladnog zraka: slika 21. prikazuje tipičnu aksijalnu raspodjelu temperature plina duž RQL komore izgaranja, kao i emisije  $\text{NO}_x$  koje obično dosežu vrhunac u blizini područja osiromašenja smjese. GE LEC projektirao je niz malih lokalnih rashladnih mlaznica, nizvodno od primarnih mlaznica, uspješno snižavajući lokalnu vršnu vrijednost plina, kao i temperaturu blizu stijenke, što je rezultiralo daljnjim smanjenjem  $\text{NO}_x$  [8], [9].

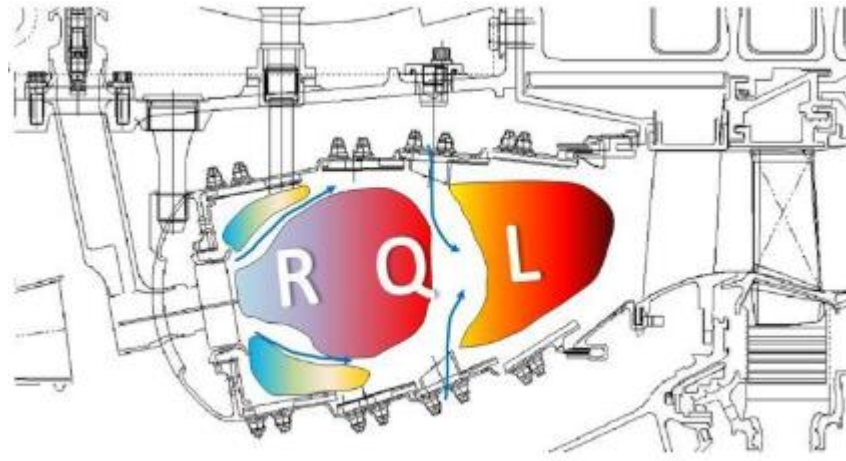


**Slika 21.** Aksijalni raspored temperature u RQL komori, [8]

### 6.2.2. Primjena RQL tehnologije

TALON obitelj po modelu RQL tehnologije (slika 22.) za plinskoturbinske motore komercijalnih zrakoplova stvorila je tvrtka Pratt & Whitney. PW4098 pokreće prva generacija, TALON I, koja je u upotrebu stupila 1999. godine s 145345 sati naleta bez dokumentiranih neplaniranih uklanjanja motora i zastoja u letu. Godine 2005., druga generacija TALON II, koja je kompatibilna s motorom PW6000, puštena je u rad i pokazala je poboljšane performanse, kao i dodatno smanjenje emisija. Nedavni TALON X korišten je u PW1500, PW1130G-JM, PW1133G1-JM te je pokazao smanjenje  $\text{NO}_x$  za 25% u usporedbi s

TALON II u ispitivanjima opreme i motora. RQL komore izgaranja također su korištene u drugim motorima, kao što je novi Rolls-Royce Trent 1000 te GE-ova serija CFM56. Zbog povećane površine potrebne za brzo osiromašenje smjese i izgaranje sa siromašnom smjesom, rane RQL komore izgaranja, imaju veću aksijalnu duljinu. Moderni TALON II i X postigli su dizajnerske ciljeve zadržavajući sličnu duljinu kao konvencionalne komore. Sveukupno RQL komore izgaranja primjenjuju se od malih do velikih kategorija motora za širok raspon potiska motora i stupnja povećanja tlaka [8].



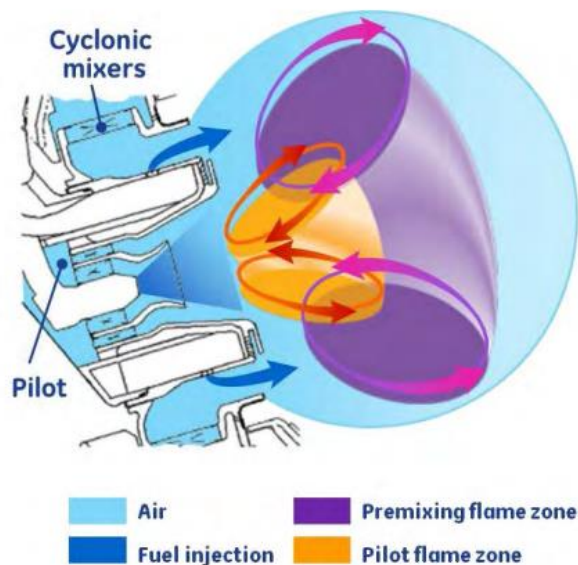
**Slika 22.** TALON komora izgaranja, [8]

### 6.3. KOMORA S DVOSTRUKIM PRSTENASTIM PRETHODNO VRTLOŽNIM MIJEŠANJEM GORIVA I ZRAKA

Komore s dvostrukim prstenastim prethodno vrtložnim miješanjem goriva i zraka (*Twin Premixing Swirler Combustor*) razvijaju se pod nazivom TAPS (*Twin Annular Premixing Swirler*) komore. Razvoj TAPS komora izgaranja započela je NASA i GE 1995. godine kao program tehnologije smanjenja emisija.

TAPS komora je razvijena na temelju naučenih lekcija prilikom faznog izgaranja u dvostrukim prstenastim komorama, a također je iskorišteno značajno iskustvo s komorama u industrijskim plinskim turbinama koje rade sa siromašnom prethodno izmiješanom smjesom.



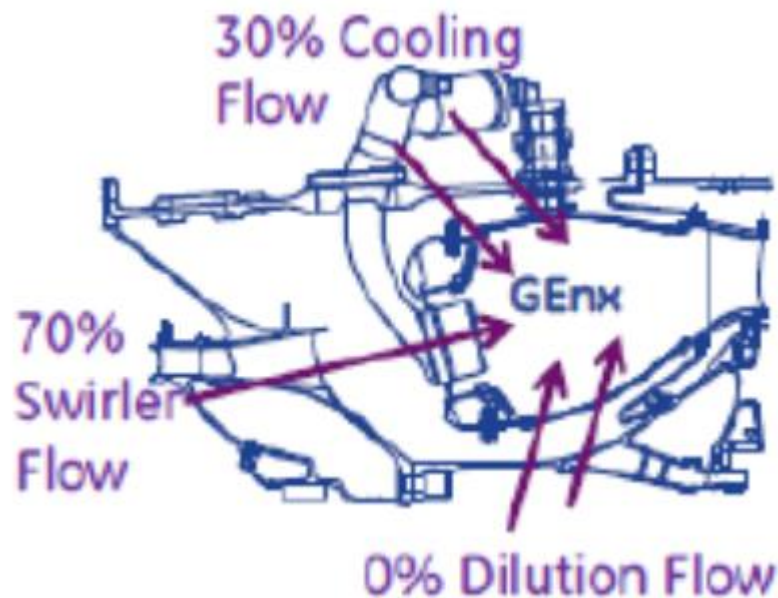


**Slika 23.** TAPS dizajn, [10]

Kao što je prikazano na slici 23., TAPS komora sadrži brizgaljku koja ubrizgava dva mlaza goriva i stvara dva vrtloga. U centralnom vrtlogu i zoni izgaranja (*Pilot flame zone*) smjesa je bogata, slično kao kod klasičnih komora. Kod pokretanja motora i malih snaga 100% goriva se ubrizgava kroz centralnu mlaznicu. Kod većih snaga gorivo se raspodjeljuje i ubrizgava kroz centralnu i glavnu mlaznicu te se kod većih snaga većina goriva ubrizgava kroz glavnu mlaznicu. Time se zapravo postiže da se izgaranje i u centralnoj (*pilot*) zoni i u glavnoj (*main*) zoni odvija sa siromašnom smjesom. Zbog toga se u čitavoj komori izgaranje provodi sa siromašnom smjesom i time izbjegavaju visoke temperature izgaranja koje pogoduju nastajanju  $\text{NO}_x$  komponenti. Brizgaljka je tako izvedena da se već u samoj brizgaljci stvara intenzivno vihorenje zraka, miješanje, isparavanja goriva i priprema smjese za izgaranje (za razliku od klasičnih brizgaljki koje ubrizgavaju gorivo u vidu kapljica goriva u zonu izgaranja). Glavna komponenta izgaranja je vrtlog s velikom učinkovitom površinom za izgaranje goriva. Kroz spomenuta dva mješača (*mixer*) goriva i zraka kroz brizgaljku prolazi oko 70% zraka koji ulazi u komoru izgaranja, a ostalih 30% služi za hlađenje plamene cijevi, slika 24. [10].

TAPS komore su npr. instalirane na motoru GEnx za širokotrupne zrakoplove poput 747-8 i 787, te ovu komoru imaju i motori CFM LEAP [10].





**Slika 24.** Raspodjela protoka zraka kroz TAPS komoru, [10]

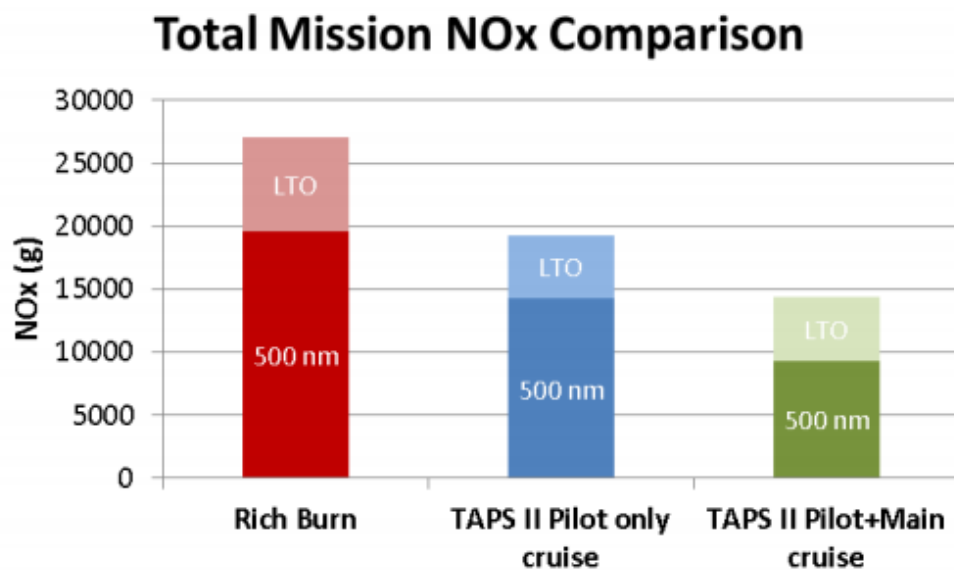
Kao što se vidi na slici 24. kod TAPS komore nema dovođenja zraka kroz otvore na plamenoj cijevi za potrebe osiromašivanja (*Dilution flow*) smjese i dogorijevanja, kao što to obavezno postoji kod klasične komore jer se smjesa pripremila u brizgaljkama i vrtloženjem iza brizgaljke. Zbog izostanka provrta za dovođenje zraka sa strane na plamenoj cijevi, smanjene su i koncentracije naprezanja na plamenoj cijevi što povoljno utječe na trajnost komore [10].

Zbog navedenog načina pripreme smjese, neki autori ovu komoru svrstavaju djelomice i u komore koje nazivamo LDI (*Lean Direct Injection*) komore ili LPP (*Lean Premixed Prevaporised*) komore koje će biti opisane u sljedećem poglavlju.

### 6.3.1. Razvoj TAPS komora

Za certifikaciju motora prema ICAO Aneksu 16 mjeri se ukupna razina  $\text{NO}_x$  koji komora producira za vrijeme zadanog ciklusa polijetanja i slijetanja, tzv. LTO (*Landing-Takeoff*) ciklus. Kad se TAPS komora optimizira da se dobije niska razina  $\text{NO}_x$  koju komora emitira u tom ciklusu, tada se može dogoditi da se izgaranje odvija s presiromašnom smjesom tijekom krstarenja i time smanjuje stupanj iskoristivosti izgaranja. Da bi se smanjila potrošnja goriva, od komora se zahtijeva stupanj iskoristivosti izgaranja i veći od čak 99,9 posto.

Zbog navedenoga, može se optimizirati razdioba ubrizgavanja kroz centralnu (*pilot*) i glavnu (*main*) mlaznicu. Slika 25. uspoređuje ukupne emisije NO<sub>x</sub> za zrakoplov A320 opremljen LEAP (*Leading Edge Aviation Propulsion*) motorom. U prvom stupcu prikazane su emisije NO<sub>x</sub> iz klasične komore izgaranja koja radi s bogatom smjesom, u drugom stupcu prikazane su emisije NO<sub>x</sub> iz komore izgaranja TAPS II koja radi samo sa uključenom centralnom mlaznicom u režimu u krstarenju, a u trećem stupcu prikazane su emisije NO<sub>x</sub> iz komore izgaranja TAPS II koja radi s potpuno siromašnom smjesom kad su uključene obe mlaznice u krstarenju. Gornji dio stupca prikazuje NO<sub>x</sub> proizveden tijekom ICAO ciklusa polijetanja i slijetanja, a donji dio prikazuje NO<sub>x</sub> proizveden za misiju iznad 3000ft nadmorske visine (uspon, krstarenje i spuštanje). Graf prikazuje da je korist NO<sub>x</sub>-a od TAPS-a II u odnosu na bogato izgaranje veća ako se uzme u obzir cijela misija, a ne samo ciklus polijetanja i slijetanja. Također, pokazuje da siromašnije izgaranje pri krstarenju značajno smanjuje ukupnu emisiju NO<sub>x</sub>-a. To sugerira da će optimiziranje dizajna komore izgaranja na krstarenju rezultirati nižim ukupnim emisijama NO<sub>x</sub>-a [10].



**Slika 25.** Usporedba emisija NO<sub>x</sub>-a, [10]

Sustav izgaranja TAPS II pokazao je da je sposoban ispuniti cilj programa FAA CLEEN-a u smanjenju emisije NO<sub>x</sub>-a za 60% u odnosu prema CAEP/6 zahtjevima. TAPS II postiže ovaj cilj na motorima s većim stupnjem povećanja tlaka (od 38) nego što je bilo predviđeno u CLEEN programu (stupanj povećanja tlaka motora 30). Program je također ispunio interne ciljeve GE-a za emisiju NO<sub>x</sub> manjim od 9 g/kg goriva u režimu krstarenja, a

dizajn je prilagođen za primjenu u zrakoplovima uskog trupa. Osim što su ispunili CLEEN NO<sub>x</sub> cilj, emisije CO, HC i dima poboljšane su u odnosu na osnovni dizajn komore izgaranja i bile su znatno ispod granica CAEP/6 [10].

### 6.3.2. Budućnost TAPS-A

Sustavi izgaranja TAPS sa siromašnom smjesom uspješno su pokazali značajno smanjenje NO<sub>x</sub> i ispunili su sve zahtjeve izgaranja. Međutim, ima još prostora za daljnji razvoj:

1. Daljnji razvoj ove komore trebao bi ići ka pojednostavljenju konstrukcije i smanjenju cijene proizvoda.
2. TAPS komora koristi izgaranje siromašne smjese s faznim ubrizgavanjem goriva te će se daljnjim razvojem bolje upoznati dinamika ovakvih procesa izgaranja koja će imati za cilj dobivanje boljih metoda za optimizaciju konstrukcije i daljnje smanjenje emisije štetnih ispušnih plinova.
3. TAPS komora izgaranja je u ispitivanju i kasnije u eksploataciji pokazala prihvatljivu operativnost unatoč problemima koji mogu pratiti izgaranje sa siromašnom smjesom (samozapaljenje, gašenje, povrat plamena itd.).
4. Samozapaljenje i miješanje: Ključ za smanjenje NO<sub>x</sub> i rad pri većim stupnjevima povećanja tlaka je poboljšanje miješanja goriva i zraka i smanjenje rizika od samozapaljenja. Trenutni dizajn ima marginu samozapaljenja i osigurava prethodno miješanje goriva i zraka (već u samoj brizgaljci) , no daljnji razvoj mogao bi dovesti do još boljih rezultata.
5. Trajnost mlaznica za gorivo: Ova tehnologija izgaranja sa siromašnom smjesom uvelike se oslanja na TAPS brizgaljku za gorivo. Omogućuje ubrizgavanje bogate smjese goriva centralnom mlaznicom za male snage i ubrizgavanje siromašne smjese goriva pri velikoj snazi. Mlaznica goriva radi u vrlo teškom okruženju, što će biti dodatno otežano s motorima s većim stupnjem povećanja tlaka. Trajnost komponente bit će povećana stalnim razvojem hlađenja brizgaljke i toplinskom zaštitom.
6. Učinkovitost krstarenja: TAPS komore trebaju uspostaviti ravnotežu između visoke učinkovitosti izgaranja u krstarenju i niske emisije NO<sub>x</sub>-a prilikom ciklusa polijetanja i slijetanja [8], [10].

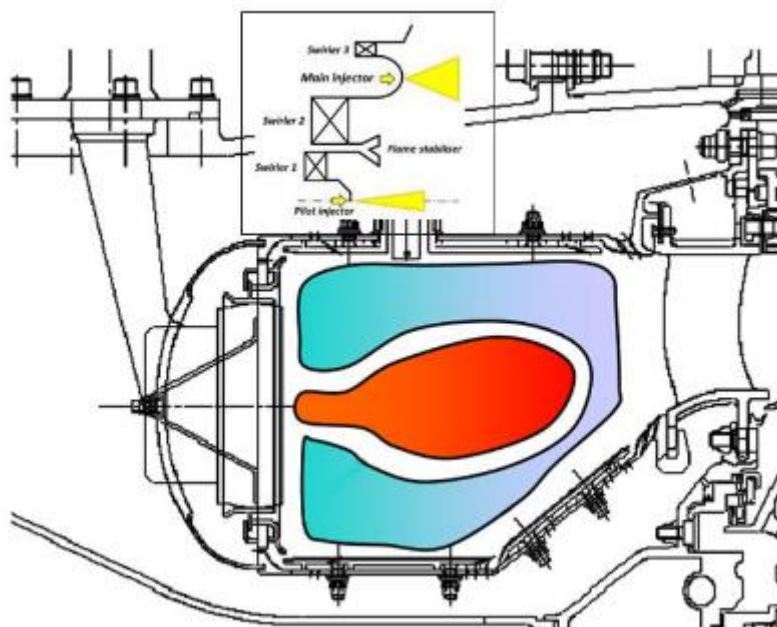
Također, u razvoju je komora izgaranja treće generacije TAPS III koja dalje razvija proces prethodnog miješanja zraka i goriva prije samoga izgaranja radi manje potrošnje i manje emisije u usporedbi s konvencionalnim komorama izgaranja. Komora izgaranja TAPS III sadržavat će poboljšani dizajn mlaznica, uporabu keramičkih materijala što će poboljšati izdržljivost i zahtijevati manje zraka za hlađenje kako bi se poboljšao proces izgaranja sa siromašnom smjesom.

## 7. DALJNI RAZVOJ KOMORA S NISKOM RAZINOM ONEČIŠĆENJA NO<sub>x</sub>

Komore izgaranja za smanjenje razine onečišćenja dušičnim oksidima i dalje su u razvoju te će biti opisane u nastavku rada.

### 7.1. LDI I MLDI KOMORE IZGARANJA

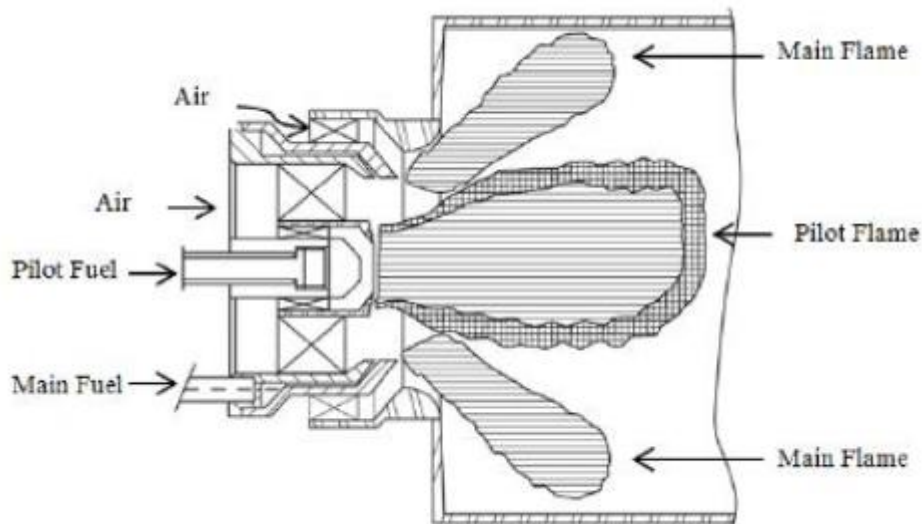
LDI (*Lean Direct Injection*) komore izgaranja djeluju tako što se gorivo ubrizgava izravno u komoru izgaranja i brzo miješa s velikim udjelom zraka. Ako se gorivo i zrak mogu dobro pomiješati prije završetka reakcije, maksimalna temperatura plamena pri srednjoj do velikoj snazi može se smanjiti upotrebom LDI-a. Budući da se kroz brizgaljku mora unijeti veći dio zraka, zrak za razrjeđivanje se uvelike smanjuje ili uklanja. Kao što je prikazano na slici 26., LDI brizgaljka zauzima veći dio površine kupole kako bi propustila veliki dio ukupnog zraka. Podjela zraka za Rolls-Royce LDI komoru izgaranja je takva da 60-70% zraka prolazi kroz sustav ubrizgavanja, a preostali zrak služi za hlađenje [8].



Slika 26. Rolls-Royce LDI komora izgaranja, [8]

Budući da se gorivo izravno ubrizgava u zonu izgaranja, umanjuje se rizik od samozapaljenja i povratnog plamena. Kako bi se postigao visok stupanj ujednačenosti smjese,

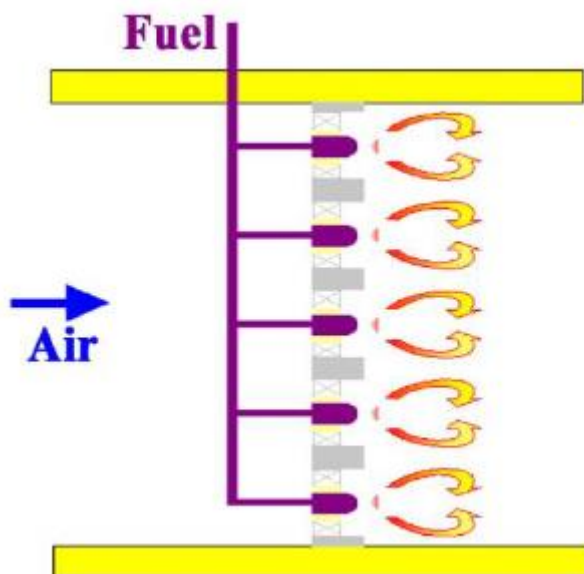
gorivo i zrak moraju se dobro pomiješati prije nego što dođe do reakcije, odnosno brzo miješanje mora se postići na kratkoj udaljenosti nakon što se gorivo ispušta iz sustava za ubrizgavanje. Kao što je prikazano na slici 27., Rolls-Royce LDI komora izgaranja prihvaća brizgaljku zračnog mlaza za glavnu zonu koji je u kombinaciji s dvostupanjskim aksijalnim vrtložiteljima zraka poboljšao proces miješanja goriva i zraka sa smanjenim vremenom zadržavanja protoka [8].



**Slika 27.** LDI injektor, [8]

Ograničeni podaci o emisijama dostupni su javnosti za Rolls-Royce LDI komoru izgaranja jer je još uvijek u razvoju. Međutim, NEWAC-ovo izvješće tvrdi da se ovom tehnologijom postiže smanjenje emisije  $\text{NO}_x$  za 70% u odnosu na CAEP/2 [8].

Princip rada NASA-inog koncepta MLDI (*Multipoint Lean Direct Injection*) komore izgaranja prikazan je na slici 28. Konvencionalna pojedinačna brizgaljka dijeli se na nekoliko odvojenih brizgaljki gdje je svaka od njih opremljena vrtloženjem zraka kako bi se osiguralo lokalno brzo i jednoliko miješanje i mala zona recirkulacije za gorenje te kraće vrijeme zadržavanja gorenja. Ujednačena smjesa i kraće vrijeme zadržavanja doprinose nižoj razini proizvodnje  $\text{NO}_x$ . Izgaranje sa siromašnom smjesom u kombinaciji s ovim postiže ultra niske emisije [8].



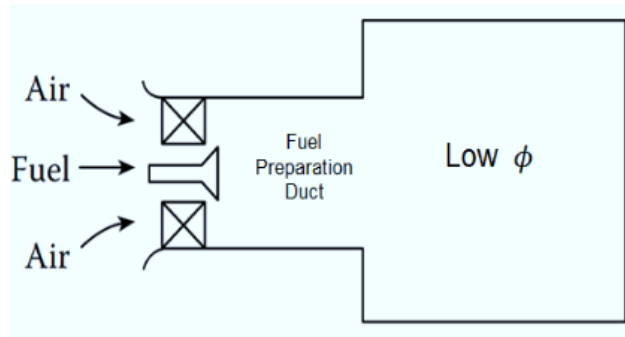
**Slika 28.** Shema MLDI komore izgaranja, [8]

NASA-in koncept MLDI komore izgaranja ima zadaću ispuniti ciljeve ERA-e (*Environmentally Responsible Aviation*) od 75% smanjenja  $\text{NO}_x$  za stupnjeve povećanja tlaka od 55.

## 7.2. LEAN PREMIXED PREVAPORISED COMBUSTORS (LPP)

Čini se da je za tekuća goriva najperspektivnija komora koja osigurava izgaranje sa siromašnom smjesom prethodno potpuno izmješanim i isparenim gorivom, to je tzv. LPP (*Lean Premixed Prevaporised Combustor*) komora izgaranja koja osigurava izrazito nisku koncentraciju  $\text{NO}_x$ . Taj koncept je djelomice primijenjen kod TAPS komore izgaranja. Koncept je shematski prikazan na slici 29. Gorivo se najprije ispari, a zatim se pomiješa s protokom zraka kako bi se stvorila homogena smjesa prije ulaska u zonu izgaranja pri niskom faktoru zraka koji je blizu granične vrijednosti siromašnog izgaranja. Zbog niske temperature plamena i ravnomjernog miješanja,  $\text{NO}_x$  je smanjen na minimum homogenom smjesom niskog faktora zraka. Tipično izgaranje LPP-a podijeljeno je u tri regije: prva je za ubrizgavanje goriva, isparavanje i miješanje goriva i zraka, što omogućuje potpuno isparavanje goriva i miješanje goriva i zraka; druga je za izgaranje s plamenom stabiliziranim u zonama recirkulacije; a treća može sadržavati uobičajenu zonu osiromašenja smjese. Dugo vrijeme potrebno za potpuno isparavanje goriva i miješanje goriva i zraka u uvjetima niske

snage moglo bi rezultirati samozapaljenjem ili povratnim plamenom u kanalu za pripremu goriva pri višim temperaturama ulaznog zraka i tlakovima povezanim s postavkama velike snage [8], [9].



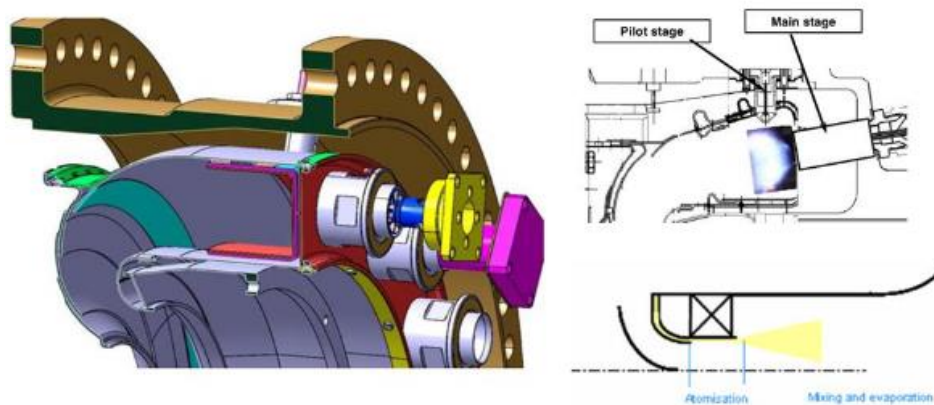
**Slika 29.** Shema LPP izgaranja, [8]

Kada su tlak, temperatura i vrijeme zadržavanja u prolazima za prethodno miješanje visoki, jedna od najvažnijih poteškoća u projektiranju LPP sustava je sprječavanje samozapaljenja ili povrata plamena unutar sustava ubrizgavanja LPP-a. Ako se plamen stabilizira u prolazu za miješanje, sustav ubrizgavanja mogao bi se oštetiti. Kada brzina plamena premaši brzinu plina duž neke struje, dolazi do povrata plamena, koji se širi uzvodno od zone izgaranja i u prolaz za prethodno miješanje. Međutim, s visokom temperaturom, tlakom i intenzitetom turbulencije, koji stvaraju veću brzinu plamena, izgaranje sa siromašnom smjesom obično smanjuje brzinu plamena. Često se javlja kroz granični sloj protoka uz stijenke prolaza za prethodno miješanje jer je tamo najniža brzina protoka. Također, povrat plamena se može pokrenuti oscilacijom izgaranja, koja proizvodi veliku amplitudu oscilacija tlaka s pozitivnim gradijentom tlaka, snižavajući lokalnu brzinu strujanja ispod brzine plamena. Povrat plamena je također uzrokovan raspadanjem vrtloga izazvanog izgaranjem, pa ako je smjesa unutar vrtložnog mjehurića koja putuje uzvodno nalazi u granicama zapaljivosti, može doći do povrata plamena.. To nameće izazov za postizanje potpunog predmiješanja i raspodjele s kraćom duljinom predmiješanja. Za moderne zrakoplovne motore do sada nije postignuto potpuno miješanje i raspodjela unutar kanala za prethodno miješanje [8], [9].

Koncept LPP razvijen je tijekom NASA-inog programa ECCP (*Experimental Clean Combustor Program*) početkom 1970-ih. Kasnije su koncept LPP-a razvili GE i P&W pod NASA-inim CPC (*Critical Propulsion Components*) programom 1990-ih. Naglasak programa



je smanjenje  $\text{NO}_x$  u uvjetima nadzvučnog krstarenja. Ciljevi programa su postići krstarenje s emisijama  $\text{NO}_x$ -a manjim od 5g/kg uz postizanje učinkovitosti izgaranja od 99.9%. Na kraju, *turbofan* s motor s LPP komorom odabrani su testni model za konačni razvoj. Dizajn je dokazao za zadovoljava zahtjeve programa za emisije i operativnost. U novije vrijeme Turbomeca je razvila LPP koncept u okviru projekta europskog programa NEWAC (*NewAC Core Aero Engine Concepts*) koji je započeo 2006. godine. Slika 30. prikazuje trodimenzionalni prikaz dizajna [8].



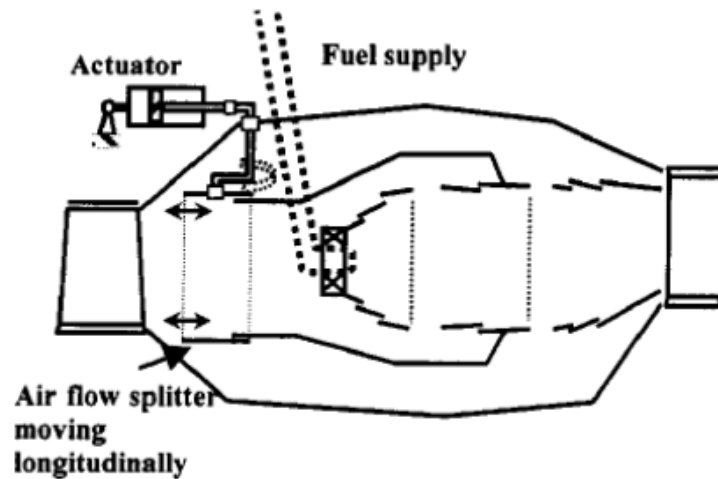
**Slika 30.** Turbomeca LPP koncept, [8]

Konept LPP-a prilagođen je komori izgaranja s obrnutim protokom koji se uklapa u međuhlađeni rekuperativni IRA (*Intercooled Recuperative*) motor sa stupnjem povećanja tlaka manjim od 25. Kako je shematski prikazano u donjem desnom kutu slike, miješanje goriva i isparavanje odvija se unutar kanala sustava za ubrizgavanje goriva. Protok zraka podijeljen je na dva dijela: jedan je namijenjen za raspršivanje goriva kroz veliku brzinu vrtloženja zraka, a drugi za miješanje i isparavanje goriva u kanalu. Budući da niži ulazni tlak i temperatura smanjuju rizik od samozapaljenja unutar sustava ubrizgavanja, LPP je idealno prilagođen za motore sa stupnjem povećanjem tlaka manjim od 25 [8], [9].

### 7.3. KOMORE IZGARANJA PROMJENJIVE GEOMETRIJE

Slika 31. shematski prikazuje princip rada komore izgaranja promjenjive geometrije. Opća strategija je regulirati protok zraka kroz sustav upravljanja promjenjivom geometrijom za kontrolu stehiometrije izgaranja u primarnoj zoni. Razdjelnikom protoka zraka upravlja hidraulički sustav i omogućuje translacijsko kretanje (pomiče se naprijed i natrag) da

promijeni površinu poprečnog presjeka, a time i omjer protoka zraka u primarnu zonu, kako je prikazano na shemi. Na nižim razinama snage, stupanj otvaranja razdjelnika povećava količinu zraka preusmjerenog unatrag, što rezultira visokim primarnim masenim odnosom goriva i zraka (*Fuel to Air Ratio*) i smanjenom brzinom protoka za visoku učinkovitost izgaranja i poboljšanu stabilnost, kao i dobru sposobnost paljenja. S povećanjem snage, razdjelnik se otvara, dopuštajući više zraka u primarnu zonu kako bi se postigao niski maseni odnos goriva i zraka, što rezultira izgaranjem sa siromašnom smjesom za smanjenje NO<sub>x</sub>-a i dima. Drugi oblik kontrole zraka koji struji u zonu izgaranja uključuje uporabu vrtložitelja promjenjive površine za kontrolu strujanja zraka koji regulira faktor zraka primarne zone izgaranja prema promjenama snage [8], [9].



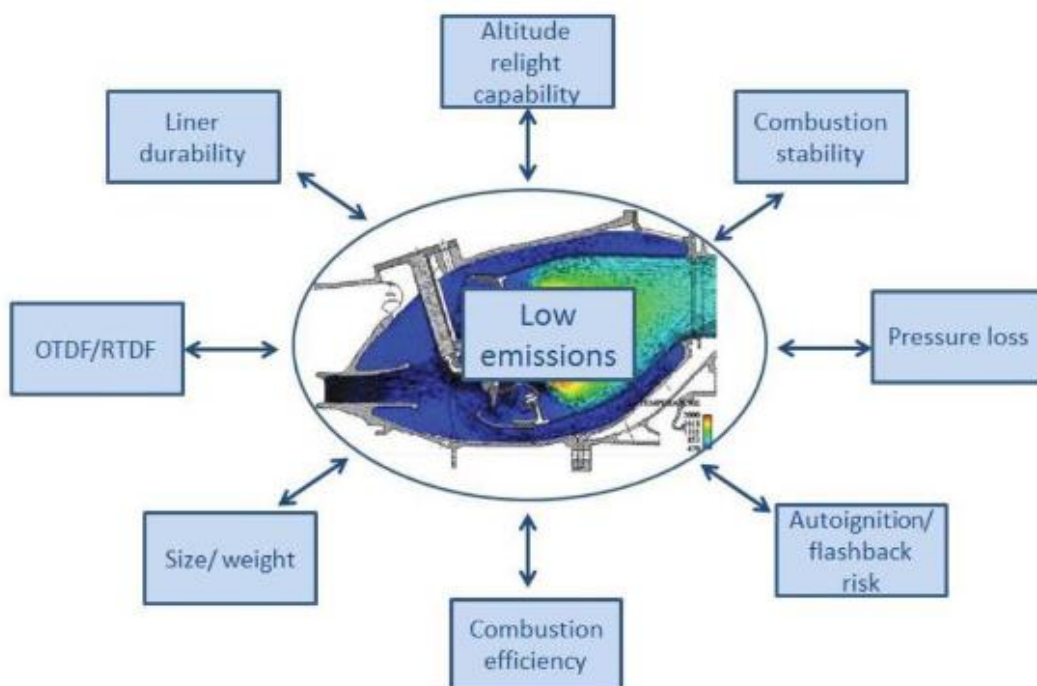
**Slika 31.** Shema koncepta promjenjive geometrije, [8]

Potencijal za postizanje svih ciljeva performansi: budući da je izgaranje promjenjive geometrije najučinkovitiji način održavanja temperature primarne zone unutar granica s niskim emisijama, ima veliki potencijal za smanjenje svih emisija uz održavanje performansi izgaranja u svim radnim uvjetima. Osim toga, sustav promjenjive geometrije pokazao je da ima poboljšane performanse ponovnog paljenja na visini [8], [9].

Koncept promjenjive geometrije još nije sazrio, pa se kao rezultat toga ne koristi u zrakoplovnim motorima. No, bio je upotrijebljen u velikim industrijskim okruženjima. S druge strane, cijena i težina sustava promjenjive geometrije neizbježno su visoki zbog složenih mehanizama upravljanja i povratne sprege, koji su sami po sebi nepouzdana. Zbog ovih razloga nije korišten na zrakoplovnim plinskim turbinama [8].

## 8. PREGLED PERFORMANSI KOMORA IZGARANJA








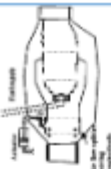
Iako bi emisije mogle biti u središtu pozornosti pri projektiranju komore izgaranja s niskom razinom emisija, važnost drugih performansi u interakciji s emisijama je i dalje u fokusu interesa (slika 32). Stoga se performanse ne smiju ugroziti pri projektiranju komore izgaranja s niskim emisijama. Sigurnost je uvijek najvažniji kriterij i nema iznimke za dizajn komore izgaranja s niskim emisijama. Sposobnost ponovnog paljenja na nekoj visini i izbjegavanje samozapaljenja/povrata plamena trebalo bi se prvenstveno razmotriti tijekom rane faze projektiranja. Stabilno izgaranje je bitno jer nestabilnost izgaranja može oštetiti dijelove komore izgaranja i postati sigurnosni problem. Operativnost se također treba smatrati visokim prioritetom kako bi se osiguralo da komora izgaranja može raditi u širokom rasponu režima rada motora. Kriteriji performansi, poput učinkovitosti izgaranja i otpori strujanja, tj. gubitak tlaka, ključni su pri projektiranju te dizajn komore izgaranja mora zadovoljiti sve zahtjeve motora jer su specifična potrošnja goriva i ukupna potrošnja goriva motora proporcionalni učinkovitosti izgaranja. Također, gubitak tlaka utječe na cijelu konstrukciju motora, posebno za specifičnu potrošnju goriva. Veličina i težina važni su za zračne primjene, osobito za male i srednje zrakoplove. Kako bi se ispunili uvjeti trajnosti, komoru je potrebno projektirati tako da osigurava rad tijekom tisuća sati i ciklusa leta [8]. Faktori (slika 32.) koji utječu na komoru izgaranja za smanjenje onečišćenja će biti navedeni u nastavku teksta.



Slika 32. Utjecaji na dizajn komore izgaranja, [8]

Osim razine emisija, kvalitativno se vrednuju i brojni parametri učinkovitosti izgaranja. Slika 33. prikazuje listu performansi koja bi se koristila za razmatranje prilikom dizajna komore izgaranja. Pri tome se vrednuju sljedeći parametri i performanse:

1. Razina tehnološke spremnosti od razine 1-9 (*TRL-Technologies Readiness Level*)
2. Sposobnost ponovnog paljenja na visini (*Altitude Relight Capability*)
3. Rizik samozapaljenja/povrata plamena (*Autoignition/flashback risk*)
4. Stabilnost izgaranja (*Combustion Stability*)
5. Učinkovitost izgaranja pri velikim snagama (*Combustion Efficiency (High Power)*)
6. Učinkovitost izgaranja pri malim snagama (*Combustion Efficiency (Low Power)*)
7. Gubitak tlaka (*Pressure Loss*)
8. LTO NO<sub>x</sub> pri velikim snagama
9. LTO CO pri malim snagama
10. LTO UHC pri malim snagama
11. Dimnost (*Smoke Number*)
12. Težina (*Weight*)
13. Rizik koksiranja goriva (*Fuel Coking Risk*)
14. Trajnost plamene cijevi (*Liner Life*)
15. OTDF/RTDF kvaliteta (OTDF - *Overall Temperature Distribution Factor*, RTDF – *Radial Temperature Distribution Factor*)

NO.	Criterion	RQL	DAC	ASC	TAPS	LDI	MLDI	LPP	VGC
	Schematics [27][10][9][136] [137][87][106][113]								
1	TRL (9)	9	9	≤5	9	≤7	≤5	≤5	< 5 (for aerosols)
2	Altitude relight capability	High	Moderate	Moderate	Moderate	Moderate	Low	Moderate	Higher
3	Autoignition/flashback risk	Low	Low	Low	Moderate	Low	Low	High	Low
4	Combustion stability	High	Moderate	Moderate	Moderate	Moderate	Moderate	Low	Moderate
5	Combustion efficiency (High power)	High	High	High	High	High	High	High	High
6	Combustion efficiency (Low power)	High	High	Higher	High	High	High	High	Higher
7	Pressure loss	Moderate	Moderate	Moderate	Moderate	Moderate	High	Moderate	High
8	LTO NOx (high power)	Low	Lower	Lower	Even	Even	Even	Lowest	Lower
9	LTO CO (low power)	Moderate	Higher	Moderate	High	High	High	High	Low
10	LTO UHC (low power)	Moderate	High	Low	Low	Low	Low	Low	Low
11	Smoke number	High	Moderate	Low	Low	Low	Low	Low	Low
12	Weight	Moderate	Heavy	Heavy	Moderate	Moderate	Moderate	Moderate	Heavy
13	Fuel coking risk	Moderate	Moderate	Higher	Moderate	High	High	Moderate	Moderate
14	Liner life	Moderate	Moderate	Moderate	Long	Long	Long	Long	Moderate
15	OTDF/RIDE quality	High	Moderate	High	Higher	Higher	Higher	Higher	Moderate

Slika 33. Pregled performansi za komore izgaranja s niskim emisijama, [8]

## 9. ZAKLJUČAK

Većina napora da se pooštri kontrola emisije onečišćujućih tvari iz komora izgaranja usmjerena je na  $\text{NO}_x$ . Niske razine  $\text{NO}_x$  lako se mogu postići uklanjanjem zona visoke temperature iz komore no problem je u održavanju niskih temperatura plamena pri velikoj snazi bez žrtvovanja performansi izgaranja tijekom rada pri niskim snagama. Koriste se komore s faznim izgaranjem, RQL komore izgaranja i TAPS komore izgaranja, a u razvoju su LDI i MLDI komore izgaranja, LPP komore te komore izgaranja promjenjive geometrije. Zasad se čini da razvoj različitih oblika faznog izgaranja najviše obećava, unatoč povećanoj složenosti motora u smislu rasporeda i strategije upravljanja ubrizgavanja gorivom. Dosadašnji rad na različitim postavkama RQL-a pokazao je da ovaj koncept ima veliki potencijal za iznimno niske emisije  $\text{NO}_x$ . Njegove buduće mogućnosti prvenstveno ovise o tome mogu li se bogati produkti izgaranja primarne zone pomiješati dovoljno brzo s preostalim zrakom za izgaranje za učinkovito smanjenje  $\text{NO}_x$ -a i čađe. Jedini način da se ispune stalni zahtjevi za očuvanjem izvora goriva je poboljšanje učinkovitosti ciklusa motora. U stvarnosti to obično podrazumijeva povećanje stupnja povećanja tlaka motora, što smanjuje emisiju  $\text{CO}_2$ , ali povećava temperaturu i razine  $\text{NO}_x$ . Zbog toga želja da se potroši manje goriva i tako proizvede manje  $\text{CO}_2$  je u suprotnosti s jednako kritičnim zahtjevom za smanjenje  $\text{NO}_x$ . Očekuje se da će se stupanj povećanja tlaka motora u bliskoj budućnosti popeti na otprilike maksimalno 60, no buduće će komore morati smanjiti emisije  $\text{NO}_x$  za još 50% i gotovo eliminirati čađe i nestabilnost izgaranja. To će biti buduća pitanja istraživanja i razvoja. U zrakoplovnim mlaznim motorima danas se najviše koriste komore tipa TAPS te se i dalje radi na razvoju novih komora za smanjenje onečišćenja.

## LITERATURA

- [1] E. Bazijanac i A. Domitrović »Zrakoplovne emisije« [Mrežno]. Preuzeto sa: <https://www.fpz.unizg.hr/zan/wp-content/uploads/2013/02/Bazijanac-Domitrovic-Emisije-zrakoplovnih-motora-autorizirana-predavanja-i-dodaci.pdf> [Pristupljeno: kolovoz 2021.]
- [2] »Komora izgaranja« [Mrežno]. Preuzeto sa: [https://moodle.srce.hr/2019-2020/pluginfile.php/3448815/mod\\_resource/content/0/KOMORA%20IZGARANJA\\_novo\\_EB%202015.pdf](https://moodle.srce.hr/2019-2020/pluginfile.php/3448815/mod_resource/content/0/KOMORA%20IZGARANJA_novo_EB%202015.pdf) [Pristupljeno: kolovoz 2021.]
- [3] U. Honegger: Gas turbine combustion modeling for a parametric emissions monitoring system, Kansas State University, Manhattan, Kansas, 2007.
- [4] »Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution« [Mrežno]. Preuzeto sa: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7108289/> [Pristupljeno: kolovoz 2021.]
- [5] »Kisele kiše« [Mrežno]. Preuzeto sa: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Kisele\\_ki%C5%A1e#Stanje\\_u\\_Hrvatskoj](https://hr.wikipedia.org/wiki/Kisele_ki%C5%A1e#Stanje_u_Hrvatskoj) [Pristupljeno: kolovoz 2021.]
- [6] »Fotokemijski smog« [Mrežno]. Preuzeto sa: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Fotokemijski\\_smog#Posljedice\\_fotokemijskog\\_smoga](https://hr.wikipedia.org/wiki/Fotokemijski_smog#Posljedice_fotokemijskog_smoga) [Pristupljeno: kolovoz 2021.]
- [7] F. Ommi i M. Azimi »Most effective combustion technologies for reducing NOx emissions in aero gas turbines« [Mrežno]. Preuzeto sa: [https://www.researchgate.net/publication/270391033\\_Most\\_effective\\_combustion\\_technologies\\_for\\_reducing\\_Nox\\_emissions\\_in\\_aero\\_gas\\_turbines](https://www.researchgate.net/publication/270391033_Most_effective_combustion_technologies_for_reducing_Nox_emissions_in_aero_gas_turbines) [Pristupljeno: kolovoz 2021.]
- [8] »Review of modern low emissions combustion technologies for aero gas turbine engines« [Mrežno]. Preuzeto sa: [https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/handle/1826/12499/Review\\_of\\_modern\\_low\\_emissions\\_combustion\\_technologies-2017.pdf;jsessionid=76FABC6573AC3047B25406E34BDD3D22?sequence=3](https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/handle/1826/12499/Review_of_modern_low_emissions_combustion_technologies-2017.pdf;jsessionid=76FABC6573AC3047B25406E34BDD3D22?sequence=3) [Pristupljeno: rujan 2021.]
- [9] A.H. Lefebvre: Gas Turbine Combustion, Taylor and Francis, New York, 2010.

- [10] »TAPS II Combustor Final Report« [Mrežno]. Preuzeto sa:  
[https://www.faa.gov/about/office\\_org/headquarters\\_offices/apl/research/aircraft\\_technology/cleen/reports/media/taps\\_ii\\_public\\_final\\_report.pdf](https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/apl/research/aircraft_technology/cleen/reports/media/taps_ii_public_final_report.pdf) [Pristupljeno: rujan 2021.]
- [11] »Enviromental Justice Australia« [Mrežno]. Preuzeto sa:  
<https://www.envirojustice.org.au/our-work/community/air-pollution/health-effects-of-so2-and-nox/> [Pristupljeno: rujan 2021.]



## POPIS SLIKA

Slika 1. Geneza nastanka konstrukcije klasične komore izgaranja, [2] .....	4
Slika 2. Klasična komora za izgaranje, [2].....	5
Slika 3. Vrste komora izgaranja, [2] .....	6
Slika 4. Utjecaj opterećenja motora na koncentracije štetnih ispušnih plinova, [2] .....	8
Slika 5. Utjecaj sastava smjese i ulaznog tlaka zraka na koncentraciju CO, [2] .....	9
Slika 6. Utjecaj kvalitete raspršivanja na formiranje čestica čađi, [2] .....	11
Slika 7. Utjecaj temperature i vremena reakcije na koncentraciju NO <sub>x</sub> , [2] .....	13
Slika 8. Utjecaj vremena reakcije i sastava smjese na formiranje NO <sub>x</sub> , [2] .....	13
Slika 9. Utjecaj sastava smjese i tlaka zraka na formiranje NO <sub>x</sub> , [2] .....	16
Slika 10. Utjecaj prosječne vrijednosti promjera kapljica goriva na formiranje NO <sub>x</sub> , [2] .....	17
Slika 11. Fotokemijski smog, [6].....	19
Slika 12. ICAO standardi za emisije NO <sub>x</sub> -a, [1] .....	23
Slika 13. Utjecaj temperature u primarnoj zoni komore izgaranja, [2].....	24
Slika 14. Utjecaj bogatstva smjese na koncentraciju produkata izgaranja, [1].....	25
Slika 15. Dvostruka prstenasta komora, [1] .....	26
Slika 16. Serijsko fazno izgaranje, [1] .....	27
Slika 17. Princip rada RQL komore, [8] .....	28
Slika 18. Model RQL komore izgaranja, [1].....	28
Slika 19. Shema RQL komore izgaranja, [9].....	29
Slika 20. TALON X mlaznica, [8].....	30
Slika 21. Aksijalni raspored temperature u RQL komori, [8] .....	31
Slika 22. TALON komora izgaranja, [8].....	32
Slika 23. TAPS dizajn, [10].....	33
Slika 24. Raspodjela protoka zraka kroz TAPS komoru, [10] .....	34
Slika 25. Usporedba emisija NO <sub>x</sub> -a, [10] .....	35
Slika 26. Rolls-Royce LDI komora izgaranja, [8] .....	38
Slika 27. LDI injektor, [8].....	39
Slika 28. Shema MLDI komore izgaranja, [8] .....	40
Slika 29. Shema LPP izgaranja, [8] .....	41
Slika 30. Turbomeca LPP koncept, [8] .....	42
Slika 31. Shema koncepta promjenjive geometrije, [8] .....	43
Slika 32. Utjecaji na dizajn komore izgaranja, [8].....	44
Slika 33. Pregled performansi za komore izgaranja s niskim emisijama, [8] .....	46



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti  
10000 Zagreb  
Vukelićeva 4

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj \_\_\_\_\_ završni rad  
isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na  
objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz  
necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj  
visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu \_\_\_\_\_ završnog rada  
pod naslovom **KOMORE IZGARANJA ZRAKOPLOVNIH MLAZNIH MOTORA S  
NISKOM RAZINOM ONEČIŠĆENJA DUŠIČNIM OKSIDIMA**

na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom  
repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

Student/ica:

U Zagrebu, 9/10/2021 \_\_\_\_\_

Luka Lukić  
*(potpis)*