

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI
DIPLOMSKI STUDIJ AERONAUTIKE**

**ZRAKOPLOVNE EMISIJE
DIO: Emisije zrakoplovnih motora**



**AUTORIZIRANA PREDAVANJA
ERNEST BAZIJANAC, ANITA DOMITROVIĆ**

VER. 1. 2012/13

VER. 2. 2014/15

VER. 3. 2016/17

PREDGOVOR

Ovi nastavni materijali namijenjeni su za studente koji pohađaju predmet „Zrakoplovne emisije“ u zimskom semestru I godine diplomskog studija Aeronautike. Predmet se sastoji od dva dijela, i ti prvog dijela kodnog imena „Buka“ i drugog dijela nazvanog „Plinovi“. U stvari, radi se o emisijama koje sadrže zrakoplovnu buku i produkte izgaranja zrakoplovnih motora.

Ovi nastavni materijali obrađuju drugi dio predmeta, odnosno emisije zrakoplovnih motora u vidu ispušnih plinova ili produkata izgaranja fosilnih goriva.

Obzirom na razvoj spoznaja o štetnosti i utjecaju emisija na čovjeka i okoliš općenito te na porast zračnog prometa s jedne strane i sve strože zrakoplovne propise koji reguliraju ovo područje s druge strane, ovi nastavni materijali se kontinuirano dopunjuju i prilagođavaju.

Unatoč trudu i želji da teme budu aktualne i obrađene na najbolji mogući način, svjesni smo da su pogreške i propusti mogući, pa molimo čitatelje da jave uočene pogreške i propuste, kako bi materijal ispravili odnosno ažurirali za sljedeće izdanje.

Zagreb, početkom ak.god.2016/17.

Autori

Sadržaj:

1. UVODNA RAZMATRANJA
2. OSNOVE IZGARANJA
3. ZRAKOPLOVNA REGULATIVA VEZANA UZ EMISIJE ZRAKOPLOVNIH MOTORA
4. UTJECAJ ISPUŠNIH PLINOVA MLAZNIH MOTORA NA ONEČIŠĆENJE ATMOSFERE
5. MJERE ZA SMANJENJE ONEČIŠĆENJA ISPUŠNIM PLINOVIMA
6. TRGOVANJE EMISIJAMA (*EUETS*) I UČINKOVITO TROŠENJE GORIVA (*FE*)

Literatura

Dodaci:

1. Podloge za praktikum
2. Primjeri ispitnih pitanja
3. Popis završnih i diplomskih radova iz područja emisija zrakoplovnih motora

1. UVODNA RAZMATRANJA

U uvodnom dijelu gradiva (prva dva poglavlja) obratit će se pažnja na teorijske osnove procesa izgaranja zrakoplovnih motora te ponavljanje znanja koja su potrebna za razumjevanje procesa izgaranja.

1.1.OSNOVNE MJERNE JEDINICE ZA KOLIČINU PLINA

1.1.1. Standardni ili normalni uvjeti

Već je poznato iz sadržaja kolegija na preddiplomskom studiju da performanse pogonskih sustava i zrakoplova ovise o stanju atmosfere, posebno od temperature i tlaka. Da bi se performanse mogle uspoređivati, važno je definirati referentne uvjete za usporedbu. Zbog navedenoga, definiramo tzv. normalne ili standardne uvjete. Vrijednosti tlaka i temperature koje proglašavamo normalnim ili standardnim i mogu se razlikovati u ovisnosti od tehničkih disciplina u kojima se definiraju. Tako npr., u aerodinamici smo se već susretali sa ISA/SL standardnim uvjetima, a ovdje definiramo sljedeće uvjete koje proglašavamo normalnim ili standardnim:

$$p_0=101\,325\text{ N/m}^2 \text{ i } T_0=273,15\text{ K.}$$

1.1.2. Molekularna masa i Avogadrov zakon

Molekularna masa m je broj koji nam kaže koliko je puta masa molekule neke tvari veća od mase jedne dvanaestine atoma ugljikovog izotopa ^{12}C . Dakle, molekularna masa m je bezdimenzionalni broj.

Molekularne mase nekih plinova iznose:

$$m_{\text{H}_2}=2$$

$$m_{\text{O}_2}=32$$

$$m_{\text{C}}=12$$

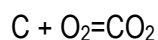
$$m_{\text{N}_2}=28$$

Avogadrov zakon glasi: U jednakim zapreminama, pri jednakom tlaku i temperaturi, svi plinovi sadrže jednak broj molekula.

Primjerice, ako u dvije posude jednakih zapremina imamo vodik H_2 i kisik O_2 , broj molekula će biti jednak, ali će se razlikovati masa plina u posudi sa vodikom i kisikom, jer molekule vodika i kisika imaju različite mase. Odnos masa vodika i kisika u tim posudama sa jednakim brojem molekula i pri jednakim tlakovima i temperaturama bit će jednak odnosu molekularnih masa, tj. vrijedit će $m_{H_2} : m_{O_2} = 2 : 32$. U posudi sa kisikom bit će 16 puta veća masa od posude sa vodikom.

1.1.3. Pojam mola i kilomola

U izgaranju se odvijaju kemijske promjene koje se svode na „ponašanje“ molekula, pa je poželjno uspostaviti takvu mjernu jedinicu koja će definirati određeni broj molekula plina, odnosno količinu tvari primjerenu za tehničke analize. Primjerice, na molekularnoj razini, kod izgaranja jedne molekule ugljika sudjeluje jedna molekula kisika i nastaje jedna molekula ugljičnog dioksida:



Definicija za mjernu jedinicu od 1 kmol glasi: To je ona količina tvari koja ima toliku masu u kilogramima koliko brojčano iznosi njegov molekularna masa.

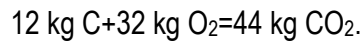
Ponekad se upotrebljava i jedinica 1 mol, koja je 1000 puta manja od 1 kmol.

Kako se kmolovi pojedinih plinova maseno odnose kao njihove relativne molekularne mase, to znači da 1 kmol bilo kojeg plina ima uvijek isti broj molekula.

To znači da 1 kmol ugljika ima masu od 12 kg, 1 kmol kisika 32 kg, a 1 kmol ugljičnog dioksida 44 kg. Gornja jednačba kemijske reakcije može se sada napisati u novim jedinicama:



Ako jedinicu za masu od 1 kmol-a određenog plina pretvorimo u mase izražene u kg-a za određeni plin, onda se gornja jednačba može pisati u obliku:



Budući da se tehnički proračuni ne rade na molekularnoj razini, ovakav pristup nam omogućava da poznavajući zakonitost kemijskih reakcija, jednostavno proračunavamo masene balanse u kemijskim procesima, u ovom slučaju u procesima izgaranja u pogonskim sustavima zrakoplova.

Važno je uočiti:

- Jedan kmol bilo kojeg plina sadrži uvijek isti broj molekula i on iznosi $N_L = 6,023 \cdot 10^{26}$ molekula /kmolu i naziva se Loschmidtov broj.
- Jedan kmol bilo kojeg plina pri istom tlaku i temperaturi zaprema isti volumen.
- Masa jednog kmola nekog plina ima toliko kilograma koliko iznosi njegova molekularna masa:

1 kmol = m kg, gdje je m - molekularna masa plina.

Iz ovog proizlazi da se sa m može označavati i tzv. **molna masa** i ima jedinicu **kg/kmol**. Ona je za razliku od molekularne mase dimenzionalan broj, no molna masa i molekularna masa numerički su međusobno jednaki.

1.1.4. Pojam normnog kubnog metra

Količinu plina jednostavnije je prodočiti volumenom nego masom. Volumen plina ovisi o tlaku i temperaturi, odnosno ista masena količina plina pri različitim tlakovim i temperaturama zauzima različite volumene. Tako je nastala jedinica **normalni ili normni kubni metar**, a koja daje jasniju predodžbu o količini plina.

Normni kubni metar je ona količina plina koja pri „normalnom“ (standardnom) stanju zaprema volumen od 1m³ i označava se nm³ ili m_n³.

Normni kubni metar nije jedinica volumena plina, već jedinica količine plina. Važno je uočiti da će 1 nm³ plina zapremati volumen od 1 m³ samo kod normalnog stanja.

1.1.5. Opća plinska konstanta

Ako jedan mol ili kilomol bilo kojeg plina sadrži isti broj molekula, onda po Avogadrovom zakonu slijedi i da jedan mol ili kilomol svakog plina pri istom tlaku i temperaturi zauzima isti volumen v_m [m³/kmol].

Kako je molna masa m -puta veća od od mase 1 kilograma, mora i volumen jednog kmola v_m [m³/kmol] biti m -puta veći od jediničnog volumena v [m³/kg]:

$$v_m = m \cdot v \quad [m^3 / kmol]$$

Primjeni li se jednadžba stanja plina na jedan kmol, onda je $V=v_m$, $G=m$:

$$P \cdot v_m = m \cdot R \cdot T$$

$$m \cdot R = \frac{P \cdot v_m}{T}$$

Za sve plinove pri istom tlaku i temperaturi, v_m su isti, što znači da je desna strana gornje jednadžbe ista, pa onda za razne plinove vrijedi:

$$m_1 R_1 = m_2 R_2 = \dots = m R = \mathfrak{R},$$

a taj se umnožak \mathfrak{R} naziva opća plinska konstanta i ona je jednaka:

$$\mathfrak{R} = 8314 \text{ J/kmol K.}$$

Individualnu konstantu bilo kojeg plina možemo izračunati ako znamo molnu masu m :

$$R = \frac{\mathfrak{R}}{m}.$$

Sada se može izračunati koji volumen zauzima 1 kmol plina kod normalnog stanja:

$$v_m = \frac{\mathfrak{R} \cdot T}{p} = \frac{8314 \cdot 273,15}{101325} = 22,41 \text{ m}^3 / \text{kmol}$$

Budući da je to masa plina u 1 m³ pri normalnim uvjetima, to je ujedno i definicija nm³. Sada se može pisati:

$$1 \text{ nm}^3 = \frac{1}{22,41} \text{ kmol} = \frac{m}{22,41} \text{ kg}$$

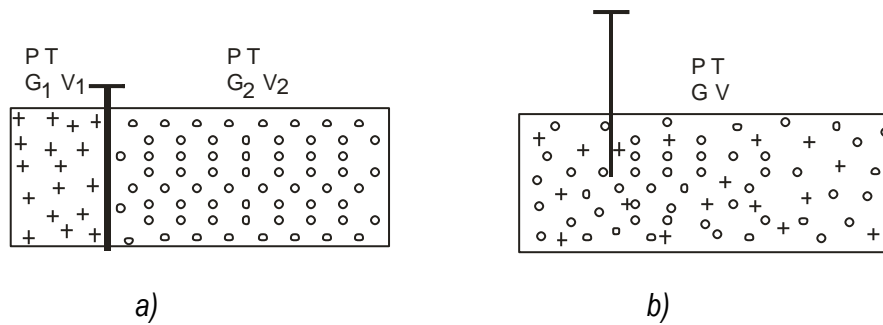
odnosno:

$$1 \text{ kmol} = 22,41 \text{ nm}^3 = m \text{ kg}.$$

1.2. PLINSKE SMJESE

1.2.1. Maseni i volumni udjeli u smjesi plinova

Zrak i ispušni plinovi sadrže više vrste plinova, odnosno čine plinsku smjesu. Da li za plinske smjese vrijede zakoni koji vrijede za idealne plinove? Da bi odgovorili na to pitanje, zamislimo sljedeći eksperiment. U posudi (slika 1.) se nalaze dva plina odijeljena pregradom. Tlakovi i temperature jednog i drugog plina su jednaki i iznose p i T . Nakon podizanje pregrade, plinovi će se izmješati i novonastala mješavina će ostati na tlaku p i temperaturi T .



Slika 1. Miješanje plinova: a) prije miješanja, b) poslije miješanja

Poznato je da u smjesi vlažnog atmosferskog zraka postoji određena količina vode u obliku vodene pare. Znamo da temperatura isparavanja vode pri atmosferskom tlaku iznosi 100°C , a to znači da voda pri temperaturi okoline i pri atmosferskom tlaku ne može biti u parovitom stanju. Pri atmosferskoj temperaturi, voda može biti u parovitom stanju samo ako je na tlaku znatno nižem od atmosferskog. Ta se pojava objašnjava Daltonovim zakonom!

Volumen i masa plinova iznose:

$$V_1 + V_2 + \dots + V_n = V$$

$$G_1 + G_2 + \dots + G_n = G$$

odnosno:

$$\frac{V_1}{V} + \frac{V_2}{V} + \dots + \frac{V_n}{V} = 1$$

$$\frac{G_1}{G} + \frac{G_2}{G} + \dots + \frac{G_n}{G} = 1$$

Volumne udjele V_n/V označimo sa r_n , a masene udjele G_n/G označimo sa g_n , Tada se može pisati:

$$r_1 + r_2 + \dots + r_n = 1$$

$$g_1 + g_2 + \dots + g_n = 1$$

Ponekad je potrebno iz zadanih volumnih udjela u smjesi izračunati masene udjele i obrnuto. U tu svrhu postavimo molarne jednadžbe stanja, npr. za dva sudionika prije mješanja:

$$p \cdot V_1 = M_1 \cdot \mathfrak{R} \cdot T$$

$$p \cdot V_2 = M_2 \cdot \mathfrak{R} \cdot T$$

Budući da općenito vrijedi:

$$M = \frac{G}{m}$$

Može se pisati:

$$p \cdot V_1 \cdot m_1 = G_1 \cdot \mathfrak{R} \cdot T$$

$$p \cdot V_2 \cdot m_2 = G_2 \cdot \mathfrak{R} \cdot T$$

Iz omjera lijevih i desnih strana dobiva se:

$$\frac{r_1 \cdot m_1}{r_2 \cdot m_2} = \frac{g_1}{g_2}$$

Za n sudionika vrijedi:

$$g_1 : g_2 : \dots : g_n = r_1 \cdot m_1 : r_2 \cdot m_2 : \dots : r_n \cdot m_n$$

Iz navedenih izraza uz $\sum r_i = 1$ i $\sum g_i = 1$ mogu se odrediti volumenski udjeli:

$$r_i = \frac{g_i (m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 \dots m_{i-1} \cdot m_{i+1} \dots m_n)}{A},$$

$$A = g_1 \cdot m_2 \cdot m_3 \dots m_n + g_2 \cdot m_1 \cdot m_3 \dots m_n + \dots + g_n \cdot m_1 \cdot m_2 \dots m_{n-1}$$

ili maseni udjeli,

$$g_i = \frac{r_i \cdot m_i}{\sum_{i=1}^n r_i \cdot m_i}$$

1.2.2. Parcijalni tlakovi i Daltonov zakon

Postavimo jednadžbu stanja plina za prvog sudionika prije i poslije miješanja, slika 1. Prije miješanja prvio je sudionik pod tlakom p , ima temperaturu T i zauzima volumen V_1 :

$$p \cdot V_1 = G_1 \cdot R_1 \cdot T .$$

Poslije miješanja, prvio sudionik će se raširiti po čitavom volumenu V . Zbog navedenog, tlak će se smanjiti na neki tlak p_1 kojega nazivamo parcijalni tlak. Postavimo jednadžbu stanja prvog sudionika nakon miješanja:

$$p_1 \cdot V = G_1 \cdot R_1 \cdot T$$

Budući da su desne strane gornjih jednadžbi jednake, to se može pisati:

$$p \cdot V_1 = p_1 \cdot V ,$$

odnosno:

$$\frac{p_1}{p} = \frac{V_1}{V} = r_1 , \text{ odnosno } p_1 = r_1 \cdot p .$$

I za ostale sudionike, ako ih ima n , može se pisati.

$$p_2 = r_2 \cdot p; \quad p_3 = r_3 \cdot p; \quad p_n = r_n \cdot p .$$

Parcijalni tlak pojedionog sudionika u plinskoj smjesi jednak je umnošku njegovog volumnog udjela i ukupnog tlaka smjese.

Zbrojimo li gornje jednadžbe, proizlazi:

$$p_1 + p_2 + \dots + p_n = p(r_1 + r_2 + \dots + r_n).$$

Budući da je

$$r_1 + r_2 + \dots + r_n = 1$$

bit će

$$p_1 + p_2 + \dots + p_n = p,$$

Što predstavlja tzv. **Daltonov zakon** koji izražen riječima glasi:

Zbroj parcijalnih tlakova pojedinih sudionika u smjesi jednak je ukupnom tlaku smjese. Odnosno, u smjesi plinova, svaki se plin širi preko čitavog raspoloživog prostora i proizvodi pri tom svoj tlak, kao da drugi plinovi nisu ni prisutni. Dotični plin nakon u mješavini ima pri tome parcijalni tlak koji odgovara njegovoj jednadžbi stanja plina za volumen u kojem se nalazi mješavina.

1.2.3. Jednadžba stanja plinske smjese

Za plinove-sudionike smjese važe sljedeće jednadžbe stanja plina:

$$p_1 \cdot V = G_1 \cdot R_1 \cdot T$$

$$p_2 \cdot V = G_2 \cdot R_2 \cdot T$$

...

$$p_n \cdot V = G_n \cdot R_n \cdot T$$

Kada se zbroje navedene jednačbe, bit će

$$p_1 \cdot V + p_2 \cdot V + \dots + p_n \cdot V = G_1 \cdot R_1 \cdot T + G_2 \cdot R_2 \cdot T + \dots + G_n \cdot R_n \cdot T$$

$$(p_1 + p_2 + \dots + p_n) \cdot V = (G_1 \cdot R_1 + G_2 \cdot R_2 + \dots + G_n \cdot R_n) \cdot T$$

Budući da je:

$$G_n = g_n \cdot G \quad \text{i} \quad \sum_{i=1,n} p_i = 1,$$

te se može pisati:

$$p \cdot V = G \cdot T (g_1 \cdot R_1 + g_2 \cdot R_2 + \dots + g_n \cdot R_n),$$

odnosno, može se skraćeno pisati:

$$p \cdot V = G \cdot T \cdot R_s,$$

gdje R_s nazivamo plinsku konstantu plinske smjese i ona je jednaka:

$$R_s = g_1 \cdot R_1 + g_2 \cdot R_2 + \dots + g_n \cdot R_n.$$

Plinska smjesa se ponaša poput nekog zamišljenog idealnog plina, pa možemo za nju izračunati i zamišljenu molekularnu masu m_s :

$$m_s = \frac{\mathfrak{R}}{R_s}.$$

Količina smjese izražena u kmolovima iznosi:

$$M = \frac{G}{m_s}.$$

Tu je

$$M = M_1 + M_2 + \dots + M_n.$$

Takođe može se pokazati da vrijedi još i ovo:

$$m_s = \sum_{i=1,n} (r_i \cdot m_i) \text{ i}$$

$$r_i = \frac{V_i}{V} = \frac{p_i}{p} = \frac{M_i}{M}.$$

Primjer 1.1.

Zrak je pretežito smjesa dušika i kisika. Volumni udio kisika je 21%. Koliko su maseni udjeli kisika i dušika u zraku?

Rješenje:

Volumni udio kisika je 0,21:

$$r_{O_2} = r_1 = 0,21.$$

Budući da su dva sudionika u smjesi zraka, može se pisati:

$$r_{O_2} + r_{N_2} = r_1 + r_2 = 1.$$

Iz toga proizlazi:

$$r_{N_2} = r_2 = 0,79.$$

Molekularna masa kisika i dušika iznosi:

$$m_1 = m_{O_2} = 32 \text{ i } m_2 = m_{N_2}$$

Sada se mogu izračunati maseni udjeli kisika g_1 i dušika g_2 .

$$g_1 = \frac{m_1 \cdot r_1}{m_1 \cdot r_1 + m_2 \cdot r_2} = \frac{32 \cdot 0,21}{32 \cdot 0,21 + 28 \cdot 0,79} = 0,233$$

$$g_2 = \frac{m_2 \cdot r_2}{m_1 \cdot r_1 + m_2 \cdot r_2} = \frac{28 \cdot 0,79}{32 \cdot 0,21 + 28 \cdot 0,79} = 0,767$$

Primjer 1.2.

U 2 kg vlažnog zraka, temperature 313 K i tlaka 750 mmHg, nalazi se 100g vodene pare. Pod kojim se parcijalnim tlakovima nalaze zrak i vodena para ako smatramo da je zrak jedan sudionik relativne molekularne mase 29?

Rješenje:

Budući da je 1 mm Hg = 133,3 N/m², ukupni tlak jednak je

$$p = 133,3 \cdot 750 \approx 100000 \text{ N} / \text{m}^2.$$

Masa smjese-vlažnog zraka jednaka je $G=2$ kg, a masa vodene pare $G_2=0,10$ kg, pa je masa suhog zraka G_1 jednaka

$$g_{zr} = g_1 = \frac{G_1}{G} = \frac{G - G_2}{G} = \frac{2 - 0,10}{2} = 0,95$$

Relativna molekularna masa vodene pare jednaka je

$$m_2 = m_{H_2O} = 2 \cdot 1 + 1 \cdot 16 = 18$$

Volumni udio zraka r_1 i vodene pare r_2 jednak je:

$$r_1 = \frac{g_1 \cdot m_2}{g_1 \cdot m_2 + g_2 \cdot m_1} = \frac{0,95 \cdot 18}{0,95 \cdot 18 + 0,05 \cdot 29} = 0,92,$$

$$r_2 = 1 - r_1 = 0,08.$$

Prema Daltonovom zakonu, parcijalni tlakovi zraka i vodene pare iznose:

$$p_1 = r_1 \cdot p = 0,92 \cdot 10^5 = 92000 \text{ N/m}^2$$

$$p_2 = r_2 \cdot p = 0,08 \cdot 10^5 = 8000 \text{ N/m}^2.$$

Kako smo i očekivali, da bi voda mogla biti u parovitom stanju na temperaturi od 313 K, vodena para se mora nalaziti na vrlo malom tlaku.

2. OSNOVE IZGARANJA

2.1. MASENI SASTAV GORIVA

2.1.1. Goriva za klipne motore

Izgaranje je vezivanje gorivih elemenata s oksidatorom, odnosno to je oksidacija gorive tvari. Pogonsko gorivo za zrakoplovne klipne motore je **avionski benzin - AB** (*Aviation Gasoline - AVGAS*). Samo su neki motori predviđeni i za rad s **motornim benzinima - MB** (*Motor Gasoline - MOGAS*). Za pogon Diesellovih motora rabi se **Dieselovo gorivo - D**.

S obzirom na oktanski broj proizvode se ove vrste avionskih benzina koji su, radi lakšeg raspoznavanja, obojeni različitim bojama :

- AVGAS 80 crvenom,
- AVGAS 100 zelenom,
- AVGAS 100LL plavom, niska koncentracija olova (*LL-Low Lead*).

Na aerodromima u Republici Hrvatskoj isporučuje se samo AVGAS 100 LL.

Donja ogrjevna vrijednost (*Lower Heating Value*) avionskih benzina kreće se u granicama od $H_f=43,1$ do $44,0$ MJ/kg. **Gustoća** avionskih benzina je oko $0,72$ kg/dm³.

Osnovni gorivi elementi u avionskom i motornom benzinu jesu ugljik i vodik. Približni sastav elemenata izgleda ovako:

$$\begin{array}{l}
 \text{ugljika:} \quad c \approx 0.85 \frac{\text{kg}_{\text{ugljika}}}{\text{kg}_{\text{goriva}}}, \\
 \text{vodika:} \quad h \approx 0.15 \frac{\text{kg}_{\text{vodika}}}{\text{kg}_{\text{goriva}}}, \\
 \text{kisika:} \quad o \approx 0.00 \frac{\text{kg}_{\text{kisika}}}{\text{kg}_{\text{goriva}}}.
 \end{array}$$

2.1.2. Gorivo za mlazne motore

Po definiciji mlazna goriva su složene otopine tekućih ugljikovodika naftnog porijekla i dodataka koji se koriste kao pogonsko gorivo za za pogon mlaznih motora na zrakoplovima.

Postoji nekoliko standardiziranih vrsta tzv. mlaznih goriva.

JET A1 (*AVTUR - Aviation Turbine Fuel*): To je gorivo petrolejskog tipa i propisano je našim standardom gdje se vodi pod nazivom GORIVO ZA MLAZNE MOTORE GM-1. Gustoća goriva na 15 C je od 775 do 840 kg/m³. Točka paljenja najmanje 38 C, točka zamrzavanja najviše -47 C, a ogrijevna vrijednost najmanje 42,8 MJ/kg. To gorivo je najviše u uporabi.

JET A: Slično gorivu JET A1 samo što ima točku zamrzavanja od -40 C. To gorivo je uglavnom dostupno u SAD.

JET B (*AVTAG - Aviation Turbine Gasoline*): To je gorivo širokofrakcijskog tipa. Gustoća goriva na 15 C je 770 kg/m³. Ima vrlo nisku točku upaljivosti od -20 C, a točku zamrzavanja od -60 C. Zbog niske točke zapaljivosti, iz sigurnosnih razoga ne koristi se u civilnom zrakoplovstvu.

Mlazna goriva se ne označavaju posebnom bojom tako da mogu poprimiti boje od blijedo žute do bezbojne.

U gorivo se dodaju razni aditivi:

- Inhibitor zamrzavanja goriva (*FSII - Fuel System Icing Inhibitor*). Određena količina vode je prisutna u gorivu. Pri niskim temperaturama ona se može zamrznuti stvarajući kristale leda koji začepljuje cijevi sustava za napajanje gorivom. Također voda pogoduje razvoju mikrobiološkog onečišćenja (gljivica) koje također mogu začepliti cijevi, a gljivice su i korozivne i obično su štetne za zaptivne materijale spremnika za gorivo. FSII aditivi umanjuje navedene probleme.
- Poboljšivači mazivosti (*HITEC - Lubricity Agent*) smanjuju trošenje elemenata kinematskih parova uređaja iz sustava za napajanje gorivom.
- Antistatik (*Static Dissipater*) aditivi eliminiraju opasnost od statičkog elektriciteta koji se generira proticanjem goriva kroz uređaje.
- Deaktivatori kovina (*Metal Deactivator*) smanjuju katalitičko djelovanje pojedinih metala (npr. bakra) na oksidaciju goriva.

- Inhibitor korozivnosti (*Corrosion Inhibitor*) smanjuju koroziju cijevi i elemenata uređaja.
- Antioksidansi smanjuju oksidaciju goriva.

Osnovni gorivi elementi u gorivu za mlazne motore jesu ugljik i vodik i kisik. Približni sastav elemenata izgleda ovako:

$$\begin{array}{l}
 \text{ugljika : } c \approx 0.89 \frac{\text{kg}_{\text{ugljika}}}{\text{kg}_{\text{goriva}}} \\
 \text{vodika : } h \approx 0.09 \frac{\text{kg}_{\text{vodika}}}{\text{kg}_{\text{goriva}}} \\
 \text{kisika : } o \approx 0.02 \frac{\text{kg}_{\text{kisika}}}{\text{kg}_{\text{goriva}}}
 \end{array}$$

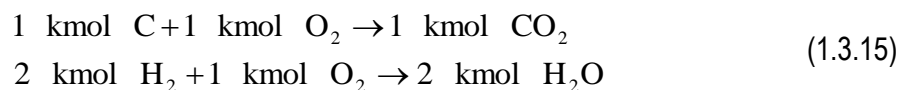
2.2. MASENA BILANCA IZGARANJA

2.2.1. Izračun potrebne količine zraka za izgaranje

Na temelju tvarne, masene bilance izgaranja može se odrediti potrebna količina zraka za izgaranje kilograma goriva. Pojednostavnjeno, kemijske reakcije izgaranja gorivih elemenata odvijaju se prema:



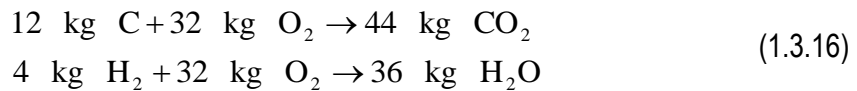
ili izraženo u molovima:



Molne mase za ugljik, kisik i vodik jesu:

$$m_C = 12 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}, \quad m_{\text{O}_2} = 32 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}, \quad m_{\text{H}_2} = 2 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}.$$

Uzimajući u obzir molnu masu, prethodni izrazi izgledaju ovako:



Nakon dijeljenja jednadžbe izgaranja sa $c/12$ i $h/4$, dobiva se:

$$\begin{aligned} c \text{ kg C} + c \frac{8}{3} \text{ kg O}_2 &\rightarrow c \frac{11}{3} \text{ kg CO}_2, \\ h \text{ kg H}_2 + h \cdot 8 \text{ kg O}_2 &\rightarrow h \cdot 9 \text{ kg H}_2\text{O}. \end{aligned} \quad (1.3.17)$$

To znači, ako **1 kg** goriva sadrži **c kg** ugljika, onda je za izgaranje tog ugljika potrebno **$c \cdot 8/3$ kg** kisika. Za izgaranje **h kg** vodika potrebno je dovesti **$8h$ kg** kisika. Sadrži li gorivo **o kg** kisika, onda se za toliko kisika manje treba dovesti za izgaranje. Iz toga proizlazi da potrebna količina kisika za izgaranje **1 kg** goriva iznosi

$$O_0 = \frac{8}{3}c + 8h - o, \quad \frac{\text{kg}_{\text{kisika}}}{\text{kg}_{\text{goriva}}}, \quad (1.3.18)$$

a budući da je maseni udio kisika u atmosferi jednak 0,23, to će potrebna količina zraka za izgaranje **1 kg** goriva biti

$$A_0 = \frac{1}{0,23} \left(\frac{8}{3}c + 8h - o \right), \quad \frac{\text{kg}_{\text{zraka}}}{\text{kg}_{\text{goriva}}}, \quad (1.3.19)$$

što za avionski i motorni benzin iznosi

$$A_0 \approx 15 \left[\frac{\text{kg}_{\text{zraka}}}{\text{kg}_{\text{goriva}}} \right].$$

Ako u smjesi na kilogram goriva dolazi upravo 15 kg zraka, smjesa je **stehiometrijskog** sastava.

Sastav smjese opisujemo **faktorom bogatstva smjese** (zove se i faktor zraka) λ

$$\lambda = \frac{A}{A_0},$$

gdje je:

A - stvarna količina zraka dovedena po 1 kg potrošenog goriva,

A_0 - stehiometrijska količina zraka za izgaranje 1 kg goriva.

Ima li u smjesi manje zraka od 15 kg po 1 kg goriva, tj. ako je $\lambda < 1$, to je **bogata** smjesa (*Rich Mixture*), a ima li više zraka, tj. ako je $\lambda > 1$, onda je to **siromašna** smjesa (*Lean Mixture*). Za stehiometrijsku smjesu $\lambda = 1$.

Sastav smjese često se opisuje i masenim odnosom goriva i zraka (*Fuel to Air - F/A*) ili zraka i goriva (*Air to Fuel - A/F*). Stehiometrijska bi smjesa prema tome, bila opisana pomoću ovih vrijednosti:

$$F / A = \frac{1}{15} = 0,067$$
$$A / F = \frac{15}{1} = 15.$$

2.2.2. Izračun količine produkata izgaranja

Na temelju tvarne bilance procesa izgaranja proizlazi da će produkti izgaranja, odnosno ispušni plinovi biti sastavljeni ovako:

- za izgaranje sa stehiometrijskom smjesom: CO_2 , H_2O i N_2 kao plin koji je ušao u komoru izgaranja sa svježim zrakom, ali nije sudjelovao u kemijskim reakcijama,
- za izgaranje sa siromašnom smjesom: CO_2 , H_2O , N_2 i O_2 kao višak nepotrošenog kisika,
- za izgaranje s bogatom smjesom: CO_2 , H_2O , N_2 i CO , H_2 kao produkti nepotpunog izgaranja zbog nedostatka kisika.

Osim navedenih plinova u realnim uvjetima izgaranja, u ispušnim plinovima Ottova motora nalaze se i ovi štetni sastojci

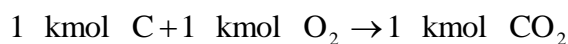
- a) dušični oksidi - NO_x nastaju kao rezultat visokih temperatura u procesu izgaranja,
- b) nesagorjeli ugljikovodici - HC nastaju kao rezultat nedovršena procesa izgaranja u cilindru motora,
- c) olovni spojevi i ostali spojevi koji potječu iz dodataka gorivu ili onečišćenja u gorivu, npr. sumporni oksidi; sadržaj olova u ispušnim plinovima Ottova motora proporcionalan je količini tetraetil olova u benzinu koji se dodaje radi poboljšanja antidetonacijskih svojstava goriva.
- d) dimne čestice (koksne čestice) kao posljedica izdvajanja čvrstog ugljika u procesu izgaranja u uvjetima jakog nedostatka kisika, pri $\lambda < 0,33$. Ovakva homogena smjesa je prebogata i leži izvan granica upaljivosti pa ova pojava nije karakteristična za Otto motore koji rade sa homogenom smjesom. Kod mlaznih motora oko kapljice goriva javljaju se zone sa jako malim koficijentom viška zraka, izložene visokim temperaturama, čime se stvaraju uvjeti za dehidrogenzaciju molekula ugljikovodika i izdvajanje koksni čestica.

U nastavku će se izvršiti računaska procjena u idealnim uvjetima izgaranja.

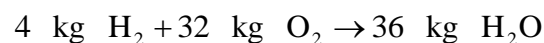
Potpuno izgaranje:

Potrebno je izračunati koliko kmola ili kilograma nekog ispušnog plina nastane kad izgori 1 kg goriva. Za tu svrhu ponovo možemo napisati stehiometrijske jednadžbe za kemijske reakcije s masenim bilancama.

Bilanca u kilomolovima:



i bilanca u kilogramima:



Iz gornjih jednažbi proizlazi:

$$M_{CO_2} = \frac{c}{12} \text{ [kmol } CO_2 / \text{kg goriva]}.$$

$$g_{CO_2} = \frac{44}{12} c \text{ [kg } CO_2 / \text{kg goriva]}$$

To znači, ako u 1 kg goriva gorivu ima c kg ugljika, tada će izgaranjem nastati M_{CO_2} kmola CO_2 po 1 kg izgorenog goriva, odnosno g_{CO_2} kilograma CO_2 po 1 kg izgorenog goriva.

Iz bilance za izgaranje vodika proizlazi:

$$M_{H_2O} = \frac{2}{4} h \text{ [kmol } H_2O / \text{kg goriva]}$$

$$g_{H_2O} = \frac{36}{4} h \text{ [kg } H_2O / \text{kg goriva]}$$

Pri izgaranju uz $\lambda > 1$, u ispušnim plinovima ima neiskorištenog kisika i neutralnog dušika. Količina kisika O_2 iznosi:

$$M_{O_2} = 0,21(M_A - M_{A_0}) = 0,21(\lambda - 1) \cdot M_{A_0} \text{ [kmol } O_2 / \text{kg goriva]},$$

gdje je:

M_A, M_{A_0} – stvaran i stehiometrijska količina zraka po 1 kg goriva.

$$g_{O_2} = 0,23(A - A_0) = 0,23(\lambda - 1) \cdot A_0 \text{ [kg } O_2 / \text{kg goriva]}$$

Količina dušika N_2 iznosi:

$$M_{N_2} = 0,79 \cdot M_A = 0,79 \cdot \lambda \cdot M_{A_0} \text{ [kmol } N_2 / \text{kg goriva]}$$

$$g_{N_2} = 0,77 \cdot A = 0,77 \cdot \lambda \cdot A_0 \quad [kg \ N_2 / kg \ goriva]$$

Primjer 2.1.

Četveromotorni transportni zrakoplov s motorom potiska polijetanja od 31 200 lb_f izvodi krstarenje na visini od 35 000 ft pri čemu je potisak na toj visini 6 600 lb, a TSFC= 0,545 lb_m/lb_f h. Koliko se proizvede ugljičnog dioksida za vrijeme jednosatnog leta, ako je mlazno gorivo sastava: c=0,89 kg C/kg goriva, h=0,09 kg H₂/kg goriva i o=0,02 kg O₂/kg goriva.

Rješenje:

Za vrijeme jednosatnog leta potrošnja goriva iznosi:

$$m_f = 4 \cdot F_T \cdot TSFC = 4 \cdot 6600 \cdot 0,545 = 14388 \quad lb_m / h$$

ili u kilogramima:

$$m_f = 0,453 \cdot 14388 = 6516 \quad kg / h.$$

Količina CO₂ po jednom kilogramu potrošenog goriva iznosi:

$$g_{CO_2} = \frac{44}{12} c \quad [kg \ CO_2 / kg \ goriva]$$

$$g_{CO_2} = \frac{44}{12} 0,89 = 3,263 \quad [kg \ CO_2 / kg \ goriva]$$

Na jednosatnom letu proizvest će se:

$$G_{CO_2} = m_f \cdot g_{CO_2} \quad [kg \ CO_2 / h]$$

$$G_{CO_2} = 6516 \cdot 3,263 = 21261,71 \quad kg / h$$

Nepotpuno izgaranje:

Ako dio komponenti goriva nije u potpunosti izgorio, govorimo o nepotpunom izgaranju. Nepotpuno izgaranje nastaje kad se proces izgaranja odvija s manjkom zraka, tj. kada je $\lambda < 1$. Manjak zraka za izgaranje može nastati i na lokalnom nivo, tj. na razini prosjeka $\lambda > 1$, ali zbog nesavršenog miješanja goriva i zraka, na nekim mjestima nastane nedostatak zraka. Pojava disocijacije također može biti uzrok pojave produkata izgaranja koji su rezultat nepotpunog izgaranja. Također, i u radu sa siromašnom smjesom, nepotpuno izgaranje može biti rezultat nedostatka vremena za potpuno izgaranje.

Izračun komponenti izgaranja pri $\lambda < 1$ zahtjeva poznavanje tzv. konstanti kemijske ravnože za osnovne kemijske reakcije koje se odvijaju tijekom izgaranja.

U uvjetim izgaranja klipnih motora, uzima se:

$$\frac{M_{H_2}}{M_{CO}} = k = konst$$

i za motorne benzine, kreće se u granicama $k=0,45 \dots 0,50$.

U uvjetima izgaranja $\lambda < 1$ iz ugljika u gorivu nastaje CO_2 i CO , tj. :

$$M_{CO_2} + M_{CO} = \frac{c}{12},$$

a iz vodika će nastati H_2O i H_2 .

$$M_{H_2O} + M_{H_2} = \frac{h}{2}.$$

Kisik iz zraka i o kisika iz goriva, moraju zadovoljiti sljedeću bilancu:

$$M_{CO_2} + \frac{M_{CO}}{2} + \frac{M_{H_2O}}{2} = 0,21 \cdot \lambda \cdot M_{A_0} + \frac{o}{32} = \lambda \left(\frac{c}{12} + \frac{h}{4} - \frac{o}{32} \right) + \frac{o}{32}.$$

Za dušik važi:

$$M_{N_2} = 0,79 \cdot \lambda \cdot M_{A_0}.$$

Na temelju navedenih relacija, uzimajući u obzir odnos $k=M_{H_2}/M_{CO}$, dobije se:

$$M_{CO} = 2 \frac{1-\lambda}{1+k} 0,21 \cdot M_{A0} \quad [kmol \ CO/kg \ goriva]$$

$$M_{CO_2} = \frac{c}{12} - 2 \frac{1-\lambda}{1+k} 0,21 \cdot M_{A0} \quad [kmol \ CO_2/kg \ goriva]$$

$$M_{H_2} = 2k \frac{1-\lambda}{1+k} 0,21 \cdot M_{A0} \quad [kmol \ H_2/kg \ goriva]$$

$$M_{H_2O} = \frac{h}{2} - 2k \frac{1-\lambda}{1+k} 0,21 \cdot M_{A0} \quad [kmol \ H_2O/kg \ goriva]$$

$$M_{N_2} = 0,79 \cdot \lambda \cdot M_{A0} \quad [kmol \ N_2/kg \ goriva]$$

Primjer 2.2.

Zrakoplovni klipni motor ima snagu na polijetanju 180 HP. Na krstarenju motor radi sa 75% snagom i bogatstvom smjese od $\lambda=0,96$. Koliko motor proizvede stakleničkog plina CO_2 u jednosatnom letu, ako je BSFC=0,5 lb/hp h. Gorivo je avionski benzin masenog sastava: $c=0,855$ kg C/kg goriva i $h=0,145$ kg H_2 /kg goriva.

Stehiometrijska količina zraka za izgaranje 1 kg goriva iznosi:

$$M_{A0} = \frac{1}{0,21} \left(\frac{c}{12} + \frac{h}{4} - \frac{o}{32} \right) \quad [kmol \ zraka/kg \ goriva]$$

$$M_{A0} = \frac{1}{0,21} \left(\frac{0,855}{12} + \frac{0,145}{4} \right) = 0,516 \quad [kmol \ zraka/kg \ goriva]$$

Količina plina CO₂ u kilomolovima po izgorenom 1 kg goriva iznosi:

$$M_{CO_2} = \frac{c}{12} - 2 \frac{1-\lambda}{1+k} 0,21 \cdot M_{A0} \quad [kmol \ CO_2 / kg \ goriva]$$

$$M_{CO_2} = \frac{0,855}{12} - 2 \frac{1-0,96}{1+0,5} 0,21 \cdot 0,516 = 0,0655 \quad [kmol \ CO_2 / kg \ goriva]$$

Na jednosatnom letu motor potroši goriva:

$$m_f = 0,75 \cdot P_{TO} \cdot BSFC \quad [lb / h]$$

$$m_f = 0,75 \cdot 180 \cdot 0,5 = 67,5 \quad lb / h$$

$$m_f = 0,453 \cdot 67,5 = 30,58 \quad kg / h$$

Za jedan sat, motor će proizvesti:

$$M'_{CO_2} = M_{CO_2} \cdot m_f \quad [kmol \ CO_2 / h]$$

$$M'_{CO_2} = 0,0655 \cdot 30,58 = 2,0 \quad [kmol \ CO_2 / h].$$

Izraženo kilogramima CO₂ po satu leta.

$$G'_{CO_2} = 44 \cdot M'_{CO_2} = 44 \cdot 2 = 88 \quad kg \ CO_2 / h$$

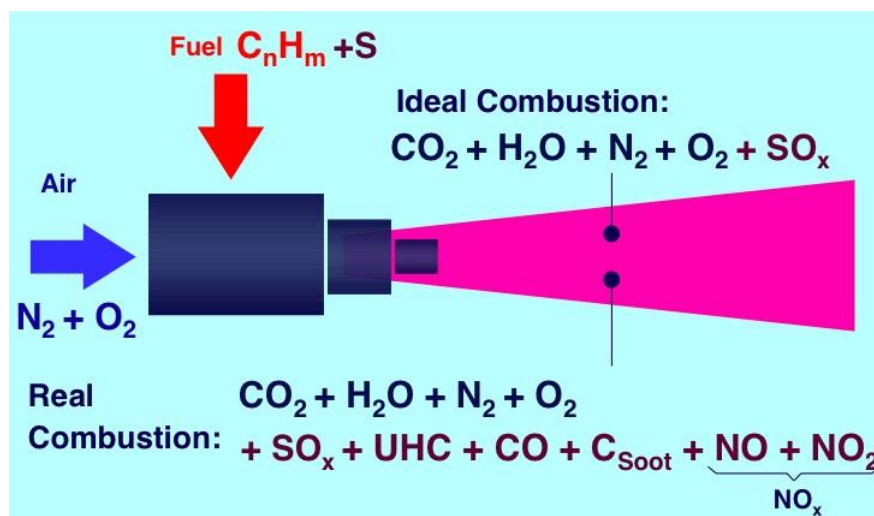
3. ZRAKOPLOVNA REGULATIVA VEZANA UZ EMISIJE ZRAKOPLOVNIH MOTORA

U ovom poglavlju govori se o zrakoplovnoj regulativi koja regulira područje projektiranja i eksploatacije zrakoplovnih motora, obzirom na emisije produkata izgaranja, odnosno ispušnih plinova.

3.1. Utjecaj emisije ispušnih plinova zrakoplovnih motora na atmosferu

Na slici 3.1. prikazan je sastav produkata izgaranja zrakoplovnih mlaznih motora pri idealnom i stvarnom izgaranju.

Ispušni plinovi mlaznih motora sastoje se približno od 7% do 8% od CO_2 i H_2O te 0.5 % NO_x , HC, CO, SO_x te od drugih kemijskih elemenata i čestica čađe. Preostali dio (91,5% do 92,5%) sastoji se od O_2 i N_2 . Emisije CO_2 i H_2O produkti su izgaranja goriva te su direktno povezane s potrošnjom goriva, što je funkcija mase zrakoplova, aerodinamičke konstrukcije i performansi motora zrakoplova. Emisije NO_x -a, čađe, CO, HC i SO_x -a uglavnom su povezane s načinom izgaranja goriva u motoru te donekle s kemijskim reakcijama koje slijede nakon izgaranja. Ove emisije uglavnom su povezane s konstrukcijom motora, pa se mogu smanjiti potpunijim izgaranjem goriva.



Slika3.1. Idealno i stvarno izgaranje goriva zrakoplovnih motora

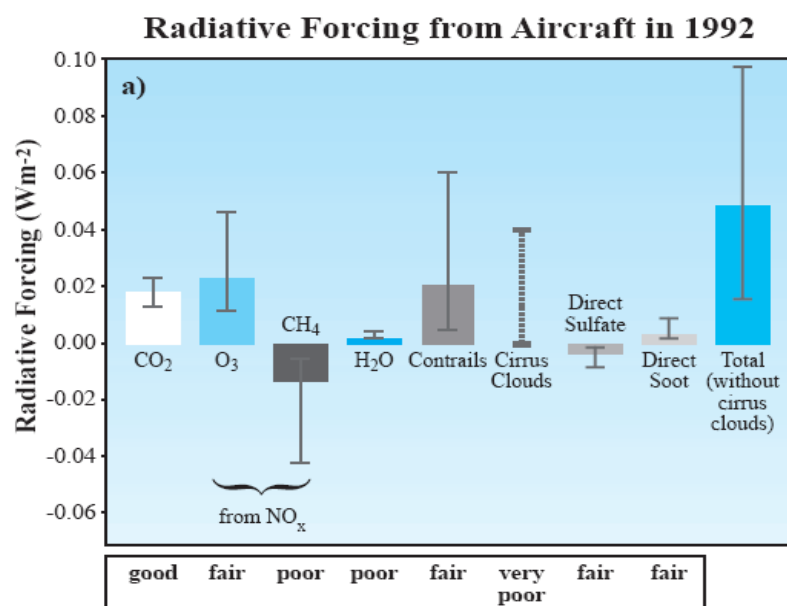
Izvor: ICAO Engine Exhaust Emissions Data Bank, First Edition 1995, ICAO, Doc 9646- AN/943. Updated 1-Oct-2004, <http://www.caa.co.uk/default.aspx?categoryid=702&pagetype=90>

Način i opseg utjecaja ispušnih plinova povezan je s nadmorskom visinom na kojoj se plinovi ispuštaju te s vremenom u kojem se plinovi zadržavaju u atmosferi. Većina produkata izgaranja zrakoplovnih motora ispušta se u gornji sloj troposfere te u donji sloj stratosfere (uglavnom na visini između 9 i 13 km). Utjecaj elemenata u ispušnim plinovima na okoliš može se očitovati u direktnim kemijskim promjenama sastava troposfere i stratosfere, u utjecaju na kemijski sastav atmosfere, u promjeni razine čestica i aerosolnih plinova, u stvaranju kondenzacijskih tragova u troposferi itd.

Na lokalnu kvalitetu zraka najviše utječu emisije NO_x , HC, CO, SO_x i čađe. Utjecaj emisija tih čestica očituje se u direktnom utjecaju na ljudsko zdravlje i okoliš, na smanjenje razine ozona, na povećanje mogućnosti nastanka kiselih kiša, na smanjenje vidljivosti i slično. Procesi koji pridonose smanjenju kvalitete lokalnoga zraka dio su skupa atmosferskih procesa koji mogu imati regionalne i globalne posljedice. Regionalne i globalne posljedice sastoje se od promjene utjecaja zračenja atmosfere koja može utjecati na promjenu klime, na smanjenje razine ozona u atmosferi, što vodi do povećanja *providnosti* atmosfere prema ultraljubičastom zračenju (UVB).

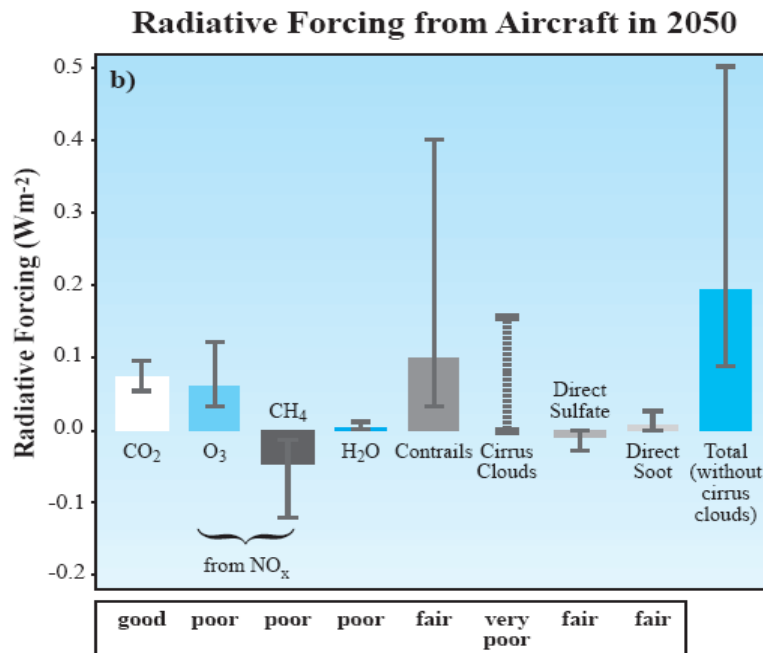
Emisije koje su bitne za atmosferske procese nisu samo emisije CO_2 . Mješavina elemenata koje zrakoplovi ispuštaju narušava *utjecaj zračenja*¹ (*radiative forcing*) dva do četiri puta više nego da je riječ o ispuštanju samo CO_2 . Za usporedbu, ukupni utjecaj zračenja kao suma promjena utjecaja zračenja uzrokovanog ljudskim djelatnostima je faktor 1,5 puta veći od samog utjecaja CO_2 . Prema tome, posljedice izgaranja goriva na nadmorskoj visini leta dvostruku su veće od posljedica izgaranja goriva na tlu. Povećan utjecaj zrakoplovnih emisija u odnosu na emisije na tlu leži u različitim fizičkim efektima (kondenzacijska staza – trag zrakoplova na nebu) i kemijskim efektima (uništavanje ozona) koji proizlaze iz drugačijih atmosferskih uvjeta i drugačijeg kemijskoga sastava zraka.

Slika 3.2. a) i b). pokazuje posljednju IPCC-ovu (*The Intergovernmental Panel on Climate Change*) procjenu utjecaja zračenja zrakoplovnih emisija 1992. te pretpostavke za 2050. Procjene za 1992. pokazuju nam da je cjelokupna podzvučna flota zrakoplova sudjelovala s 3,5% u promjenama utjecaja zračenja od svih ljudskih aktivnosti te se procjenjuje da će njezin udio do 2050. biti 5%. Na osnovu toga može se reći da će zrakoplovstvo biti odgovorno za porast od 0,05K u ukupnom rastu prosječne temperature na Zemlji od 0,9K koja se očekuje do 2050.



¹ *Utjecaj zračenja* je mjera utjecaja koji neki čimbenik ima na mijenjanje ulaznih i izlaznih energija (incoming and outgoing energies) u Zemljinom atmosferskom sustavu i oznaka je važnosti koju taj čimbenik ima kao potencijalni mehanizam u promjeni klime. Pozitivnim utjecajem dolazi do grijanja površine, dok se kod negativnog utjecaja površina hladi. Izražava se u (W/m²).

Međuvladin panel o promjeni klime (IPCC): *Promjene klime 2007.: Fizička osnova, Sažetak za donositelje politike*, str.2, http://klima.hr/razno/priopcenja/IPCC_WG1.pdf



Slika 3.2. Procjene utjecaja zračenja različitih zrakoplovnih emisija 1992. te pretpostavke za 2050.

Izvor: Penner, J. E., Lister, D. H., Griggs, D. J., Dokken, D. J., McFarland, M.: *IPCC Special Report Aviation and the Global Atmosphere, Summary for Policymakers*, <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/av-en.pdf> (9. 6. 2010.)

Proizvođači zrakoplovnih motora i zrakoplovni prijevoznici smatraju da bi smanjenje emisija zrakoplova moglo biti puno skuplje od troškova smanjenja emisija u drugim sektorima, uglavnom zbog kompleksnih utjecaja zrakoplovnih emisija na atmosferu. Unatoč tome, rastu nastojanja za smanjenjem emisija. Za promjene u klimi, smanjenje emisija u zrakoplovstvu može biti efektivnije od ekvivalentnog smanjenja emisija u drugim sektorima na tlu.

3.2. Povijesni razvoj donošenja ICAO regulative: (*Annex 16, Volume I i II*)

Poticaaj za donošenjem zrakoplovne regulative vezane uz smanjenje emisija pokrenut je u SAD-u na lokalnoj i državnoj razini, kada je 1970. Američki kongres donio "Zakon o čistom zraku" (*Clean Air Act*) koji služi kao temelj za kontrolu emisija zrakoplovnih motora. Također, Kongres je osnovao i institucije koje će donositi i provoditi regulativu.

Nadalje, 1972. godine u Stockholmu održana je UN konferencija na temu zaštite okoliša, te je na temelju zaključaka te konferencije ustanovljen ICAO-ov akcijski program obzirom na okoliš (*ICAO Action Programme Regarding the Environment*). Kao dio akcijskog programa osnovana je "Studijska grupa" (*Study group*) koja treba definirati određene zadatke koje se odnose na emisije zrakoplovnih motora, odnosno ispušne plinove.

Kao rezultat rada ove grupe nastao je ICAO circular (Circular 134) pod naslovom "*Control of the Aircraft Engine Emissions*" i objavljen je 1977. godine. Cirkular sadržava "vodič" u formi propisanih procedura za kontrolu sadržaja produkata izgaranja turbo mlaznih i optočno-mlaznih motora (*turbo jet i turbofan engines*) namijenjenih za podzvučne zrakoplove.

S ciljem smanjenja zrakoplovnih emisija iste godine (1977). osnovan je Odbor za emisije zrakoplovnih motora (CAEE – *Committee on Aircraft Engine Emissions*). Zadatak Odbora je razviti posebne standarde za ograničenja sastojaka produkata izgaranja zrakoplovnih motora.

Na drugom sastanku Odbora u svibnju 1980. godine predložen je materijal koji bi se trebao uključiti u Dokumente ICAO-a, dakle kao Annex. Nakon usaglašavanja s zemljama članicama ICAO-a ustanovljeno je da treba uključiti sve aspekte utjecaja zrakoplova na okoliš, odnosno buke i produkata izgaranja u jedan Annex. Slijedom toga, 1981. godine izašao je konačni dokument: već postojeći Annex 16 (ustanovljen 1971. slijedom prijedloga sastanka o zrakoplovnoj buci u blizini zračnih luka, *Special Meeting on aircraft Noise in the Vicinity of Aerodromes*, 1969. te osnivanjem Odbora za zaštitu od zrakoplovne buke - *Committee on Aircraft Noise*) preimenovan je kao Svezak I (*Volume I – Aircraft Noise*), i sadrži odredbe vezane uz buku zrakoplova, dok novi Svezak II (*Volume II - Aircraft Engine Emissions*) sadrži odredbe koje se odnose na emisije zrakoplovnih motora.

Detaljnije, Svezak II sadrži standarde koji zabranjuju namjerno ispuštanje sirovih goriva u atmosferu iz mlaznih motora proizvedenih nakon 18.02.1982. godine. Uključeni su i standardi koji ograničavaju emisije ugljičnog monoksida (CO), ugljikovodika (HC) i dušikovih oksida (NOx). Također, svezak II sadrži detaljan opis mjernih postupaka, instrumenta i opis statističkih metoda koje se trebaju koristiti u procjeni rezultata ispitivanja.

3.3. Sadržaj Sveska II Annex-a 16 (*Volume II - Aircraft Engine Emissions*)

Svezak II koncipiran je na sljedeći način: U dijelu I donose se osnovne definicije i opis simbola, u Dijelu II : *Vented FUEL* ("ispušteno" gorivo), a u III dijelu ograničenja za emisije mlaznih motora podzvučnih i nadzvučnih zrakoplova. Nadalje, Annex sadrži 6 Dodataka (*Appendieces*) u kojima su detaljno opisane procedure mjerenja i mjerne opreme, specifikacije goriva koje se koristi za ispitivanje te opis računskih metoda.

U nastavku su prikazane direktno ("*copy-paste*") stranice sadržaja i poglavlje s definicijama i simbolima.

TABLE OF CONTENTS

	<i>Page</i>		<i>Page</i>
Foreword	(v)	Attachment A to Appendix 3. Specification for HC analyser.....	27
Part I. DEFINITIONS AND SYMBOLS	1	Attachment B to Appendix 3. Specification for CO and CO ₂ analysers	28
CHAPTER 1. Definitions.....	1	Attachment C to Appendix 3. Specification for NO _x analyser.....	29
CHAPTER 2. Symbols.....	2	Attachment D to Appendix 3. Calibration and test gases	30
Part II. VENTED FUEL	3	Attachment E to Appendix 3. The calculation of the emissions parameters — basis, measurement corrections and alternative numerical method	31
CHAPTER 1. Administration.....	3	Attachment F to Appendix 3. Specifications for additional data	34
CHAPTER 2. Prevention of intentional fuel venting	4	APPENDIX 4. Specification for fuel to be used in aircraft turbine engine emission testing.....	35
Part III. EMISSIONS CERTIFICATION.....	5	APPENDIX 5. Instrumentation and measurement techniques for gaseous emissions from afterburning gas turbine engines	36
CHAPTER 1. Administration.....	5	1. Introduction	36
CHAPTER 2. Turbo-jet and turbofan engines intended for propulsion only at subsonic speeds	6	2. Definitions	36
2.1 General	6	3. Data required	39
2.2 Smoke	7	4. General arrangement of the system	39
2.3 Gaseous emissions	7	5. Description of component parts	39
2.4 Information required.....	8	6. General test procedures.....	40
CHAPTER 3. Turbo-jet and turbofan engines intended for propulsion at supersonic speeds.....	9	7. Calculations	41
3.1 General	9	Attachment A to Appendix 5. Specification for HC analyser.....	46
3.2 Smoke	10	Attachment B to Appendix 5. Specification for CO and CO ₂ analysers	47
3.3 Gaseous emissions	10	Attachment C to Appendix 5. Specification for NO _x analyser.....	48
3.4 Information required.....	10	Attachment D to Appendix 5. Calibration and test gases	49
APPENDICES		Attachment E to Appendix 5. The calculation of the emissions parameters — basis, measurement corrections and alternative numerical method	50
APPENDIX 1. Measurement of reference pressure ratio	13	Attachment F to Appendix 5. Specifications for additional data	53
1. General	13	APPENDIX 6. Compliance procedure for gaseous emissions and smoke	54
2. Measurement	13	1. General.....	54
APPENDIX 2. Smoke emission evaluation	14	2. Compliance procedures.....	54
1. Introduction and definitions	14	3. Procedure in the case of failure	54
2. Measurement of smoke emissions	14		
3. Calculation of smoke number from measured data	17		
4. Reporting of data to the certifying authority.....	17		
APPENDIX 3. Instrumentation and measurement techniques for gaseous emissions.....	18		
1. Introduction	18		
2. Definitions	18		
3. Data required.....	20		
4. General arrangement of the system	20		
5. Description of component parts	20		
6. General test procedures.....	21		
7. Calculations.....	22		

PART I. DEFINITIONS AND SYMBOLS

CHAPTER 1. DEFINITIONS

Where the following expressions are used in Volume II of this Annex, they have the meanings ascribed to them below:

Afterburning. A mode of engine operation wherein a combustion system fed (in whole or part) by vitiated air is used.

Approach phase. The operating phase defined by the time during which the engine is operated in the approach operating mode.

Climb phase. The operating phase defined by the time during which the engine is operated in the climb operating mode.

Date of manufacture. The date of issue of the document attesting that the individual aircraft or engine as appropriate conforms to the requirements of the type or the date of an analogous document.

Derivative version. An aircraft gas turbine engine of the same generic family as an originally type-certificated engine and having features which retain the basic core engine and combustor design of the original model and for which other factors, as judged by the certificating authority, have not changed.

Note.— Attention is drawn to the difference between the definition of “derived version of aircraft” in Volume I of Annex 16 and the definition of “derivative version” in this Volume.

Oxides of nitrogen. The sum of the amounts of the nitric oxide and nitrogen dioxide contained in a gas sample calculated as if the nitric oxide were in the form of nitrogen dioxide.

Rated output. For engine emissions purposes, the maximum power/thrust available for take-off under normal operating conditions at ISA sea level static conditions without the use of water injection as approved by the certificating authority. Thrust is expressed in kilonewtons.

Reference pressure ratio. The ratio of the mean total pressure at the last compressor discharge plane of the compressor to the mean total pressure at the compressor entry plane when the engine is developing take-off thrust rating in ISA sea level static conditions.

Note.— Methods of measuring reference pressure ratio are given in Appendix 1.

Smoke. The carbonaceous materials in exhaust emissions which obscure the transmission of light.

Smoke Number. The dimensionless term quantifying smoke emissions (*see* 3 of Appendix 2).

Take-off phase. The operating phase defined by the time during which the engine is operated at the rated output.

Taxi/ground idle. The operating phases involving taxi and idle between the initial starting of the propulsion engine(s) and the initiation of the take-off roll and between the time of runway turn-off and final shutdown of all propulsion engine(s).

Unburned hydrocarbons. The total of hydrocarbon compounds of all classes and molecular weights contained in a gas sample, calculated as if they were in the form of methane.

CHAPTER 2. SYMBOLS

Where the following symbols are used in Volume II of this Annex, they have the meanings ascribed to them below:

CO Carbon monoxide

D_p The mass of any gaseous pollutant emitted during the reference emissions landing and take-off cycle

F_n Thrust in International Standard Atmosphere (ISA), sea level conditions, for the given operating mode

F_{oo} Rated output (*see* definition)

F_{oo}^* Rated output with afterburning applied

HC Unburned hydrocarbons (*see* definition)

NO Nitric oxide

NO₂ Nitrogen dioxide

NO_x Oxides of nitrogen (*see* definition)

SN Smoke Number (*see* definition)

π_{oo} Reference pressure ratio (*see* definition)

U nastavku se donosi izvadak iz Annex-a:

Točka: 2.1.2. Definira se sastav ispušnih plinova koji se kontrolira prilikom certifikacije motora:

- Dim (Smoke)
- Neizgoreni ugljikovodici (*Unburned hydrocarbons* - HC)
- Ugljik monoksid (*Carbon monoxide* – CO)
- Dušikovi oksidi (*Oxides of nitrogen* – Nox)

Primjenjivost:

With respect to subsonic applications, the provisions of the Standards for smoke apply to engines whose date of manufacture is on or after 1 January 1983. For the gaseous emissions, the Standards apply only to engines whose rated output is greater than 26.7 kN. For hydrocarbons and carbon monoxide, they apply to engines whose date of manufacture is on or after 1 January 1986. For oxides of nitrogen, the Standards have three levels of stringency depending on the date of manufacture of the engine.

Točka 2.1.3. Emisije dima trebaju biti izmjerene i izražene kao “*Smoke Number*” – *Dimnost?*

*Def: Regulatory smoke number:*The characteristic level of the smoke number at any thrust setting, measured in accordance with Annex 16, Volume II, must not exceed $83.6 (F_{00})^{-0.274}$ or a value of 50, whichever is lower.

Točka 2.1.3: Mase udjela pojedinih plinova (HC; CO i NOx) emitiranih tijekom mjerenja u fazi uzlijetanja i slijetanja (LTO) trebaju biti izmjerene i izražene u gramima.

Točka 2.1.4: Definiraju se atmosferski uvjeti mjerenja: ISA/SL, osim referentne apsolutne vlažnosti zraka koja treba biti: 0,000634 kg vode/kg suhog zraka.

U nastavku su prikazane vrijednosti postavljenog potiska motora, vrijeme mjerenja i vrijednosti udjela ispušnih plinova.

Thrust settings

The engine shall be tested at sufficient thrust settings to define the gaseous and smoke emissions of the engine so that mass emission rates and Smoke Numbers can be determined at the following specific percentages of rated thrust as agreed by the certifying authority:

LTO(landing and take-off)operating mode Thrust setting

Take-off	100 per cent F_{00}
Climb.....	85 per cent F_{00}
Approach.....	30 per cent F_{00}
Taxi/ground idle.....	7 per cent F_{00}

Reference emissions landing and take-off (LTO) cycle

The reference emissions LTO cycle for the calculation and reporting of gaseous emissions shall be represented by the following time in each operating mode.

Phase Time in operating mode, minutes

Take-off.....	0.7
Climb.....	2.2
Approach.....	4.0
Taxi/ground idle	26.0

Regulatory levels

The characteristic levels of the gaseous emissions measured over the LTO cycle, must not exceed the following regulatory levels:

Hydrocarbons (HC): $D_p/F_{oo} = 19.6$

Carbon monoxide (CO): $D_p/F_{oo} = 118$

Oxides of nitrogen (NO_x):

- a. for engines of a type or model of which the date of manufacture of the first individual production model was on or before 31 December 1995 and for which the date of manufacture of the individual engine was on or before 31 December 1999:

$$D_p/F_{oo} = 40 + 2 \bar{I}_{oo}$$

- b. for engines of a type or model of which the date of manufacture of the first individual production model was after 31 December 1995 or for which the date of manufacture of the individual engine was after 31 December 1999:

$$D_p/F_{oo} = 32 + 1.6 \bar{I}_{oo}$$

- c. or engines of a type or model of which the date of manufacture of the first individual production model was after 31 December 2003:

1. for engines with a pressure ratio of 30 or less:

- i. for engines with a maximum rated thrust of more than 89.0 kN:

$$D_p/F_{oo} = 19 + 1.6 \bar{I}_{oo}$$

- ii. for engines with a maximum rated thrust of more than 26.7 kN but not more than 89.0 kN:

$$D_p/F_{oo} = 37.572 + 1.6 \bar{I}_{oo} - 0.2087 F_{oo}$$

2. for engines with a pressure ratio of more than 30 but less than 62.5:

- i. for engines with a maximum rated thrust of more than 89.0 kN:

$$D_p/F_{oo} = 7 + 2.0 \bar{I}_{oo}$$

- ii. for engines with a maximum rated thrust of more than 26.7 kN but not more than 89.0 kN:

$$D_p/F_{oo} = 42.71 + 1.4286 \bar{I}_{oo} - 0.4013 F_{oo} + 0.00642 \bar{I}_{oo} \times F_{oo}$$

for engines with a pressure ratio of 62.5 or more:

$$D_p/F_{oo} = 32 + 1.6 \bar{I}_{oo}$$

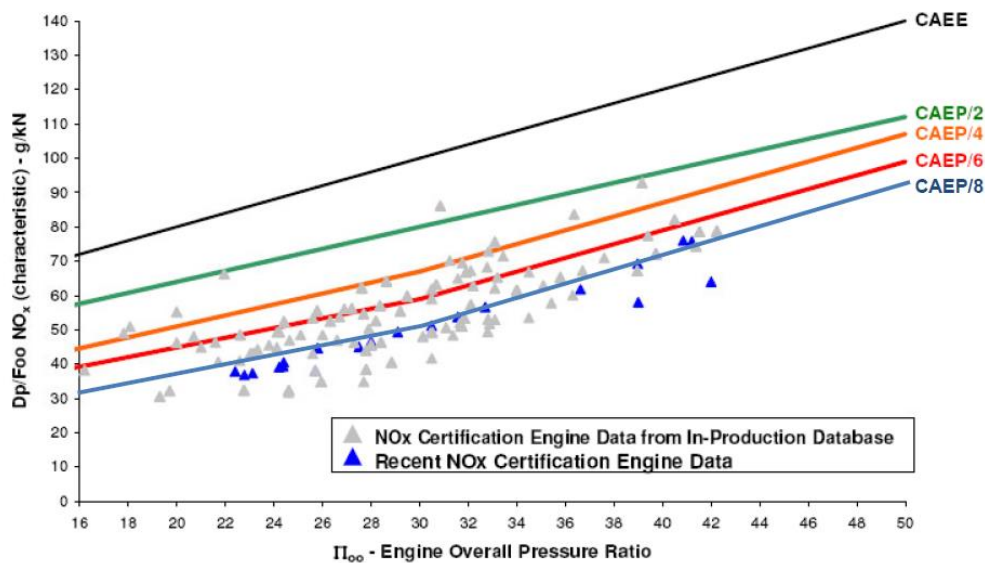
3.4. Sadašnje aktivnosti ICAO-a vezano uz emisije zrakoplovnih motora

Sadašnje aktivnosti ICAO-a provode se putem Odbora za zaštitu okoliša od zrakoplovnih djelovanja (CAEP - *Committee on Aviation Environmental Protection*) koji je osnovan na Vijeću ICAO-a 1983. godine je i kojim su ujedinjeni CAN i CAEE, tj. Odbor za Buku i Odbor za emisije zrakoplovnih motora. CAEP se sastoji od članova (*Members*) i promatrača (*Observers*). Godine 1998. Skupština (*Assembly*) je zatražila da zemlje koje nisu zastupljene u CAEP-u sudjeluju u radu Odbora. Odbor sudjeluje u formuliranju nove politike i u prihvaćanju novih standarda u vezi s bukom zrakoplova i emisijama zrakoplovnih motora. Trenutna struktura Odbora uključuje pet radnih grupa i grupu potpore. Tri radne grupe bave se tehničkim i operativnim aspektima zrakoplovnih emisija te proćavanjem tržišno utemeljenih mjera kojima bi se smanjile emisije (trgovanje emisijama, naknade za emisije (*emissions-related charges*) itd.). Preostale dvije radne grupe bave se tehničkim i operativnim aspektima smanjenja i ublažavanja buke. Grupa potpore osigurava informacije o ekonomskoj isplativosti i ekološkoj koristi mjera koje predlaže CAEP. Jedanput godišnje sastaje se upravljačka skupina kako bi se osvrnula na aktivnosti radnih grupa te im ponudila određene smjernice za daljni rad. Zasad je CAEP održao osam službenih sastanaka: 1986. (CAEP/1), 1991. (CAEP/2), 1995. (CAEP/3), 1998. (CAEP/4,) 2001. (CAEP/5), 2004. (CAEP/6), 2007. (CAEP/7) i 2010. (CAEP/8)². Rezultat svakoga je sastanka i izvještaj s posebnim preporukama koje predlaže Vijeću ICAO-a.³

Na slici 3.3. prikazani su ICAO standardi za emisije NO_x-a ustanovljeni slijedom sastanaka CAEE-a 1980. godine te CAEP-a u razdoblju od 1991. Do 2010. godine. Dijagram prikazuje udio NO_x-a u ovisnosti o stupnju povećanja tlaka motora, i vidi se da je svaki sljedeći sastanak CAEP-a donio strože standarde.

²International Civil Aviation Organization, CAEP/8-WP/77 26/1/10, Working Paper, Committee On Aviation Environmental Protection (CAEP), Eighth Meeting, Montréal, 1. - 12. 2. 2010., Agenda Item 2: Review of technical proposals relating to aircraft engine emissions, Creation of an Aire-Like Partnership to Focus on Main Traffic Flows and Reduce Emissions between Europe and Latin America, http://www.aci.aero/aci/aci/file/ACI_Priorities/Environment/2010/CAEP.8.WP.061.2.en%20aci%20nox%20str.pdf (28. 6. 2010.)

³ Posljednji je CAEP-ov sastanak održan u veljači 2010. u Montrealu. Tema je sastanka bila CREATION OF AN AIRE-LIKE PARTNERSHIP TO FOCUS ON MAIN TRAFFIC FLOWS AND REDUCE EMISSIONS BETWEEN EUROPE AND LATIN AMERICA (Stvaranje AIRE (*Atlantic Interoperability Initiative to Reduce Emissions*) partnerstva s ciljem fokusiranja na glavne prometne tokove te na smanjenje emisija između Europe i Latinske Amerike). U izvještaju su sastanka istaknute europske težnje za razvojem aktivnosti koje bi poradile na smanjenom utjecaju zrakoplovstva na okoliš na međunarodnoj razini. Istaknuta je i važnost produbljivanja inicijativa AIRE i ASPIRE (*Asia Pacific Initiative to Reduce Emissions*).



Slika 3.3. ICAO standardi za emisije NO_x-a

Izvor: Jahangir, E: ICAO Technology Goals Process for Aviation Environmental Protection, ICAO Colloquium on Aviation and Climate Change, 12. may 2010, ICAO, www.icao.int/CLQ10/Docs/3_Jahangir_Icao.pdf (1.9.2010.)

Na dijagramu:

D_p- The mass of the gaseous pollutant (masa ispušnih plinova)

F_{oo}- Thrust setting (postavljeni potisak motora)

Važno je napomenuti da ICAO standardi nisu obvezujući ni za jednog potpisnika Konvencije, ali se od potpisnika zahtijeva da nastoje postići što veću razinu unificiranosti u pravilima te da prijave sve razlike u pravilima. Naglašava se da će se regulative postrožiti kad se osjeti potreba za time, kada bude tehnološki izvedivo i ekonomski isplativo.

Vijeće ICAO-a djeluje na preporuke iz CAEP-a te uz pomoć komentara dobivenih od *Air Navigation Commission* (Odbor za zrakoplovnu navigaciju) i *Air Transport Committee* (Komisija zračnog prijevoza). Ako postoje preporuke za uvođenje ili dopunu standarda i preporučene prakse, uspostavljena je procedura za savjetovanje s državama nakon čega konačnu odluku donosi Vijeće. Skupština, koja se sastaje svake tri godine, razmatra važna politička pitanja na području zaštite okoliša na koja je skrenuta pozornost od strane Vijeća ili država.⁴

3.5. Ostali međunarodni i nacionalni propisi vezani za emisije zrakoplovnih motora

3.5.1. International Air Transport Association (IATA - Međunarodna udruga za zračni prijevoz)

Uz sigurnost i zaštitu putnika, briga za okoliš jedan je od prioriteta IATA-e. IATA pomaže zrakoplovnim tvrtkama kako bi ograničile utjecaj na klimatske promjene, proizvodnju emisija i buke. IATA-ina strategija za smanjenje emisija oslanja se na investicije u tehnologiju, unapređenje operativne efikasnosti, izgradnju i korištenje efikasnije infrastrukture te na ekonomske poticaje.

⁴International Civil Aviation Organization, Air Transport Bureau (ATB), Environment (ENV) Branch, CAEP, General, <http://www.icao.int/icao/en/env/caep.htm> (25. 8. 2010.)

Trenutno IATA sudjeluje u pripremama uključivanja zrakoplovne industrije u Europsku shemu trgovanja emisijama (EU ETS) o čemu će detaljnije biti riječi kasnije.

3.5.2. European Aviation Safety Agency (EASA - Europska agencija za sigurnost zračnog prometa)

Dana 17. listopada 2003. izvršni je direktor Agencije donio odluku, poznatiju i kao CS-34, o certifikatima kojima se potvrđuje pridržavanje odredbi u vezi sa zrakoplovnim emisijama i ispuštanjem goriva. Odluka je stupila na snagu 17. listopada 2003.⁵

3.5.3. European Civil Aviation Conference (ECAC - Europska konferencija civilnog zrakoplovstva)

Od 1974. godine ECAC-ovo djelovanje na području zaštite okoliša provodi se kroz grupu *Abatement of Nuisances Caused by Air Transport* (ANCAT) i kroz njezine podgrupe. Grupa se sastoji od predstavnika ECAC-ovih zemalja članica, zrakoplovnih operatera, proizvođača zrakoplova, zračnih luka, EUROCONTROL-a i nevladinih udruga. ANCAT je savjetodavna grupa o čijim se preporukama raspravlja na ICAO CAEP- u, Odboru za zaštitu okoliša od zrakoplovnih djelovanja.

3.5.4. European Organization for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL - Europska organizacija za sigurnost zračne plovidbe)

EUROCONTROL zajedno sa svojim partnerima smatra pitanja ekološke održivosti ključnim ciljem u svom upravljanju zračnim prometom. Mjere smanjenja utjecaja na okoliš već se naširoko primjenjuju u aerodromskim operacijama, rutiranju, letovima i upravljanju. EUROCONTROL omogućuje podršku Europskoj komisiji u pripremi za uključenje zrakoplovnih emisija CO₂ u Europsku shemu trgovanja emisijama.

3.5.5. Association of European Airlines (AEA - Udruženje europskih zrakoplovnih prijevoznika)

AEA je donijela program preporučenih mjera za smanjenje emisija štetnih plinova zrakoplovstva koji je zasnovan na četiri osnovna stupa: na daljnjem tehnološkom napretku kroz znanstveno-istraživački rad, na unapređenju infrastrukture, na operativnim mjerama (bolja regulacija zračnog prometa, optimalan izbor ruta, smanjivanje kruženja iznad zračnih luka, jedinstveno europsko nebo čijom se implementacijom namjerava smanjiti emisija CO₂ za 12pp) te ekonomskim instrumentima ETS-a (na osnovi ponude i potražnje pribavljat će se manjak ili prodavati višak prava na emisije u odnosu na potrebe i definirana prava kompanije).

⁵ European Aviation Safety Agency, The Executive Director, Decision No. 2003/3/Rm of the Executive Director of the Agency of 17 October 2003 on certification specifications providing for acceptable means of compliance for aircraft engine emissions and fuel venting (« CS-34 »), ED Decision 2003/3/RM Final 17/10/2003, <http://www.caa.gov.tw/big5/download/08-03-CS-34.pdf> (28. 6. 2010.)

3.5.6. Uključivanje zrakoplovnih emisija u Europsku shemu trgovanja emisijama (*European Union Emission Trading Scheme -EU ETS*)

(Napomena: Trgovanju emisijama ispušnih plinova bit će posvećeno posebno predavanje ovog predmeta, ovdje se navode samo osnovni pojmovi).

Ideja o međunarodnom trgovanju emisijskim jedinicama stakleničkih plinova, točnije pravima na emisiju, odobrena je u okviru Kyotskog protokola, kao jedna od mjera za smanjenje emisije stakleničkih plinova. Na principima međunarodnog trgovanja emisijama, Europska Unija razradila je sustav trgovanja emisijskim jedinicama stakleničkih plinova, temeljen na tzv. EU-ETS direktivi (2003/87/EZ). EU-ETS direktivom utvrđuje se shema za trgovanje emisijskim jedinicama stakleničkih plinova unutar Zajednice. EU-ETS za sada obuhvaća samo emisiju CO₂, kao glavnog stakleničkog plina. Sustav trgovanja emisijskim jedinicama u zemljama Europske Unije započeo je 1. siječnja 2005. godine i odvija se u etapama. Prva etapa obuhvaća razdoblje od 2005. do 2007. godine, a druga etapa je u tijeku i poklapa se s razdobljem ispunjenja obveza prema Protokolu iz Kyota, tj. od 2008. do 2012. godine. U EU-ETS sustav je uključeno svih 27 zemalja članica EU-a. Sustav obuhvaća više od 12.000 instalacija, odnosno preko 40 posto emisije CO₂ u EU-u. U okviru ETS-a države članice EU-a obvezne su ograničiti ukupne emisije stakleničkih plinova iz instalacija obuhvaćenih ETS direktivom te svakoj od instalacija izdati dozvolu za emitiranje točno određene količine emisija.⁶

Iako zrakoplovne tvrtke počinju sudjelovati plaćanjem emisija u EU ETS-u 2012. godine, kompleksne i opsežne pripreme za sudjelovanje napravljene su 2009. godine, a sustavno praćenje goriva, emisija CO₂ i tonskih kilometara trebaju se verificirati 2010. Kao globalna industrija, zrakoplovna industrija aktivno zagovara uspostavljanje globalnog ETS-a kao jedinog rješenja koje može donijeti ostvarenje globalnih ciljeva redukcije emisija zrakoplovstva. Zrakoplovne su se tvrtke aktivno uključile u kreiranje regulative preko ICAO-a, ali i preko IATA-e, svjetskog udruženja zračnih prijevoznika i AEA-e, udruge europskih zrakoplovnih prijevoznika.

Hrvatska je kao kandidatkinja za članstvo u EU-u obvezna uključiti se u sustav trgovanja emisijama CO₂ i u tom kontekstu započelo se s izradom dokumenata koji predstavljaju temelj za uspostavu raspodjele kvota kao osnove za početak trgovanja emisijama stakleničkih plinova.⁷

U procesu dizajniranja ETS-a sudjelovali su i hrvatski zrakoplovni prijevoznici. Budući da Republika Hrvatska još nije formalna članica Europske Unije, slijedom utvrđenih EU ETS pravila, Europska komisija je hrvatskim zrakoplovnim prijevoznicima za potrebe administriranja sudjelovanja u EU ETS-u dodijelila određene nadležne vlasti.⁸

3.5.7. Zakonski propisi u Republici Hrvatskoj vezani za ispušne plinove

Zračni promet u Republici Hrvatskoj uređen je Zakonom o zračnom prometu, NN 69-09, Zakonom o obveznim i stvarnopravnim odnosima u zračnom prometu, NN 132-98, NN 63-08, NN 134-09, Zakonom

⁶Granić, G., U ukupnoj potrošnji energije u Hrvatskoj na naftu otpada 45 posto, a na plin 26,7 posto, Poslovni dnevnik, <http://www.poslovni.hr/vijesti/u-ukupnoj-potrosnji-energije-u-hrvatskoj-na-naftu-otpada-45-posto-a-na-plin-267-posto-144604.aspx> (27. 8. 2010.)

⁷ Poziv na okrugli stol - 17. veljače 2009., <http://www.gradimo.hr/Hrvatska-u-kontekstu-revidirane-sheme-EU-ETS/hr-HR/13172.aspx> (27. 8. 2010.)

⁸ Godišnji i tromjesečni izvještaji o poslovanju Grupe Croatia Airlines i Croatia Airlines d.d. za 2009. g. i IV Q, <http://www.zse.hr/userdocsimages/financ/CRAL-fin2009-1Y-REV-K-HR.pdf> (22. 8.2010.)

o zračnim lukama (NN 19-98), Zakonom o osnutku Hrvatske kontrole zračne plovidbe (NN 19-98) te različitim podzakonskim propisima i međunarodnim ugovorima. Republika Hrvatska članica je ICAO-a, ECAC-a, EUROCONTROL-a i JAA-e.

Zakon o zračnom prometu NN 69-09⁹ upućuje na Organizaciju međunarodnoga civilnog zrakoplovstva (ICAO). U članku 123. desetoga dijela Zakona, pod naslovom *Zaštita okoliša* i podnaslovom *Buka zrakoplova i ispušni plinovi*, stoji da "buka zrakoplova i ispušni plinovi koje zrakoplov proizvodi prilikom uzlijetanja i slijetanja moraju biti ispod propisanih maksimalnih razina buke i ispušnih plinova utvrđenih propisom donesenim na temelju ovog Zakona i u skladu s odgovarajućim EU propisima". U članku 144. dvanaestoga dijela Zakona, pod naslovom *Ovlasti za donošenje provedbenih propisa* i podnaslovom *Propisi koje donosi ministar uz suglasnost ministra nadležnog za zaštitu okoliša, prostornog uređenja i graditeljstva* navodi se da "Ministar, uz suglasnost ministra nadležnog za poslove zaštite okoliša, prostornog uređenja i graditeljstva, donosi propise o najvećim dopuštenim razinama emisije ispušnih plinova kod uzlijetanja i slijetanja zrakoplova (članak 123.)". U članku 150. prve glave *Prekršaji u zračnome prometu* trinaestoga dijela pod naslovom *Prekršajne odredbe* navodi se "da će se novčanom kaznom od 20.000,00 do 100.000,00 kuna kazniti za prekršaj operator zrakoplova ili prijevoznik ili druga pravna osoba ako buka zrakoplova i emisija ispušnih plinova koje zrakoplov stvara pri uzlijetanju i slijetanju, nisu ispod propisanih maksimalnih razina buke i ispušnih plinova utvrđenih propisom donesenim na temelju ovog Zakona i u skladu s odgovarajućim EU propisima (članak 123.)".

Na osnovu Zakona o zračnome prometu donesen je niz pravilnika poput *Pravilnika o certifikaciji zrakoplova te projektnih i proizvodnih organizacija* kojim se propisuju tehnički zahtjevi i upravni postupci za certifikaciju proizvoda, dijelova i uređaja s obzirom na plovidbenost i zaštitu okoliša. Propisuje se izdavanje certifikata, izdavanje svjedodžbi o plovidbenosti zrakoplova, dopuštenja za letenje i potvrda o puštanju u uporabu, izdavanje odobrenja projekta popravka, dokazivanje sukladnosti zahtjevima za zaštitu okoliša, izdavanje potvrda o buci i dr.¹⁰

Propisi o plovidbenosti (tehnički zahtjevi za projektiranje) zrakoplova odnosno proizvoda i zahtjevi za zaštitu okoliša od zrakoplova određeni su važećim izdanjima certifikacijskih specifikacija EASA-e, te su primjenjivi ovisno o vrsti i kategoriji zrakoplova.

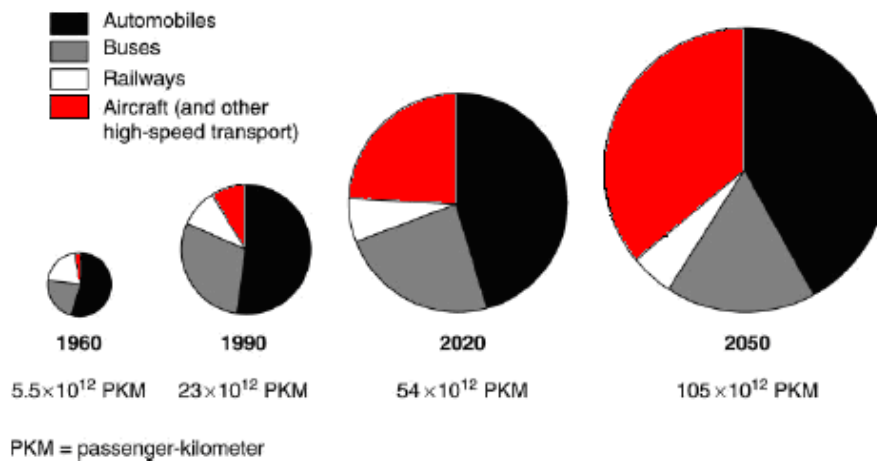
3.6. Prognoistička razmatranja o povećanju emisija zrakoplovnih motora u budućnosti

Povećanje potražnje za putovanjima povezano je s rastom bruto domaćeg proizvoda (BDP) po glavi stanovnika širom svijeta. Kako potreba za putovanjima raste, ljudi se okreću bržim načinima putovanja. Razvidno je da će stalni rast svjetske populacije i prihoda dovesti do daljne potražnje za zračnim prijevozom. Primjerice, za udaljenosti iznad 1000 km, zrakoplovi su danas dominantan oblik prijevoza.

Na slici 3.4. prikazani su udjeli različitih oblika prijevoza za razdoblje od 1960. do 1990. godine te predviđanja udjela različitih oblika prijevoza u budućnosti. Ova projekcija pokazuje da će se u odnosu na 1990. godinu obujam svjetskog prometa povećati više od dva puta do 2020. godine te više od četiri puta do 2050. godine. Zbog razmjerno velikoga obujma prometa po glavi stanovnika u više svjetskih regija u kojima prednjači Sjeverna Amerika, očekuje se da će brzi oblici prijevoza imati sve veću ulogu u ukupnome prijevozu putnika te da će do 2050. godine obuhvaćati više od jedne trećine ukupnog svjetskog prometa putnika.

⁹Zakon o zračnom prometu NN 69-09, http://narodnenovine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2009_06_69_1663.html (28. 6. 2010.)

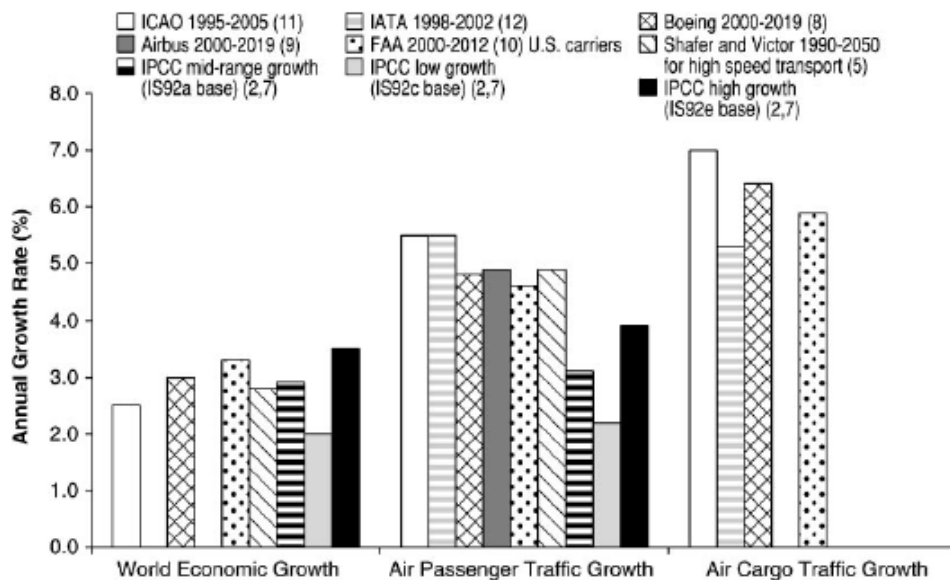
¹⁰ Izvor: http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2009_11_134_3259.html (28. 8. 2010.)



Slika 3.4. Putnički promet prema glavnim oblicima prijevoza u 1960. i 1990. godini te projekcije za 2020. i 2050. godinu

Izvor: Lee, J. J., Lukachenko, S. P., Waitz, I. A., Schafer, A.: *Historical and Future Trends in Aircraft Performance, Cost, and Emissions*, *Annu. Rev. Energy Environ.* 2001, str. 171

Isti izvor opisuje da su zračni promet i drugi oblici brzoga prijevoza obuhvaćali 2% ukupnoga putničkog prijevoza 1960.godine, a 9% 1990. godine. Pretpostavlja se da će 2020. obuhvaćati gotovo 25%, a 2050.godine 36% ukupnoga putničkog prijevoza.



Slika 3.5. Predviđanja društvenoga bruto proizvoda i zračnoga prometa prema ICAO-u, IATA-i, FAA-i, IPCC-u

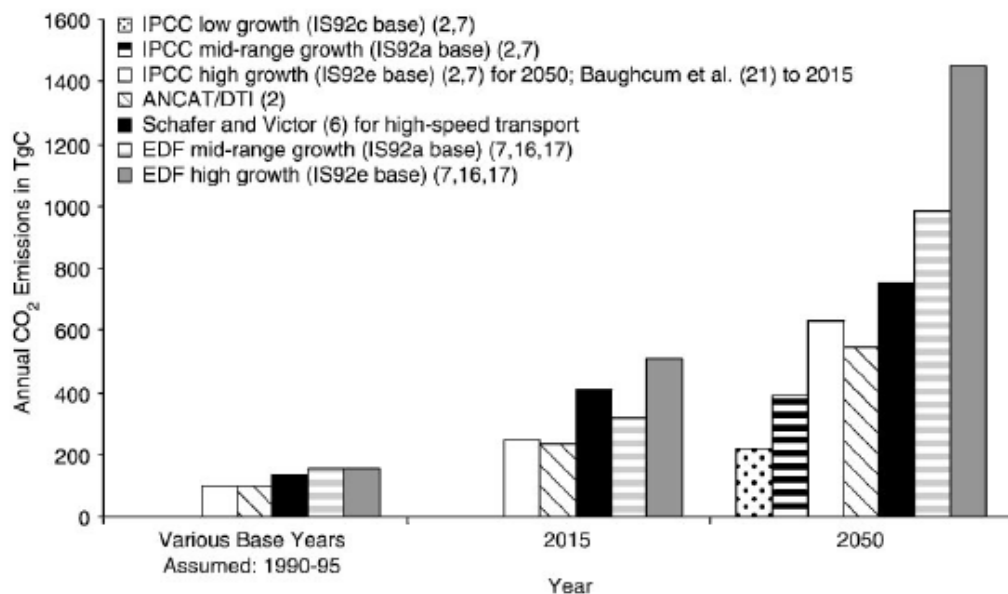
Izvor: Lee, J. J., Lukachenko, S. P., Waitz, I. A., Schafer, A.: *Historical and Future Trends in Aircraft Performance, Cost, and Emissions*, *Annu. Rev. Energy Environ.* 2001, str. 173

Slika 3.5. pokazuje predviđanja rasta svjetske ekonomije te sektora zračnoga prometa koja su načinili proizvođači zrakoplova (Boeing i Airbus), vladine organizacije (IPCC, FAA, ICAO), Međunarodna udruga

za zračni prijevoz (IATA) te znanstvenici (Schafer i Victor). Jedna od glavnih razlika između projekcija u ovom grafičkom prikazu jest u odnosu između ekonomskoga rasta i pretpostavljenoga rasta zračnog prometa. Predviđa se da će teretni prijevoz rasti i brže od putničkoga prijevoza, ali da će i dalje zauzimati manje od 10% zrakoplovnih tonskih kilometara.

Prometni sektor obuhvaća otprilike jednu četvrtinu ukupne potrošnje goriva širom svijeta te tako rast obujma prometa ima veliki utjecaj na okoliš. Iako tehnološki i operativni napretci mogu umanjiti taj utjecaj, porast potražnje za prometom jest glavni čimbenik povećanja ukupne mase emisija. Godine 1990. zračni promet je imao udio od 2,4% ukupne potrošnje fosilnih goriva širom svijeta., što čini približno 12% ukupnoga goriva korištenog u prometnome sektoru, što čini zračni promet drugim najvećim potrošačem goriva nakon cestovnoga prometa. Usporedi li se civilno i vojno zrakoplovstvo, ukupne emisije plinova flote komercijalnih zrakoplova čine gotovo 90% ukupnih emisija u zrakoplovstvu.

Da bi se omogućile procjene budućih emisija, razvijene su metode koje kombiniraju predviđanja tehnološkog i operativnog napretka s pretpostavkama prometnog rasta. Dugoročna predviđanja emisija putničkoga zračnog prometa do 2050. prikazana su na slici 3.6.. U usporedbi s ranim devedesetima, potrošnja goriva te ukupne emisije CO₂ povećat će se tri do sedam puta do 2050.godine što odgovara rastu od 1.8% do 3.2% godišnje. Uz različite projekcije rasta potražnje za zračnim prometom, drugi uzročnici razlika u predviđanjima budućih emisija jesu i različite pretpostavke razvoja zrakoplovne tehnologije, razvoja svjetske flote, i slično.



Slika 3.5. Različita predviđanja emisija zrakoplovne flote u putničkom zračnom prometu

Izvor: Lee, J. J., Lukachenko, S. P., Waitz, I. A., Schafer, A.: *Historical and Future Trends in Aircraft Performance, Cost, and Emissions*, *Annu. Rev. Energy Environ.* 2001, str. 175

4. UTJECAJ ISPUŠNIH PLINOVA MLAZNIH MOTORA NA ONEČIŠĆENJE ATMOSFERE

Ovo poglavlje govori u utjecaju ispušnih plinova na ljude i okoliš.

4.1. Ispušni plinovi koji utječu na onečišćenje atmosfere

Onečišćivači se mogu uvjetno podijeliti na primarne i sekundarne. Onečišćenje primarnim zagađivačima ovisi o: režimu rada pogonskog sustava zrakoplova, kemijskog sastava goriva i visine leta, dok sekundarni onečišćivači ovise o kemijskom sastavu goriva, sastavu zraka i visini leta, izvoru emisije i slično.

Ispušni plinovi koji najviše utječu na onečišćenje atmosfere su:

- Ugljični dioksid (CO_2)
- Vodena para (H_2O)
- Dušikovi oksidi ($\text{NO}_x = \text{NO}$ i NO_2)
- Sumporovi oksidi (SO_x)

Vrijeme zadržavanja pojedinih primjesa u zraku nije jednako. SO_2 se zadržava od 1 do 6 dana, čestice vodene pare od 3 do 7 dana, dušični oksidi (NO_x) od 1 do 3 dana, ugljikovodici (HC) od 1 do 2 dana, dok se CO_2 zadržava oko 0,3 godine.

Sveukupno je jedna petina zrakoplovima uvjetovanih polutanata emitirana u donjim stratosferskim slojevima, dok je ostalih četiri petine unutar troposfere.

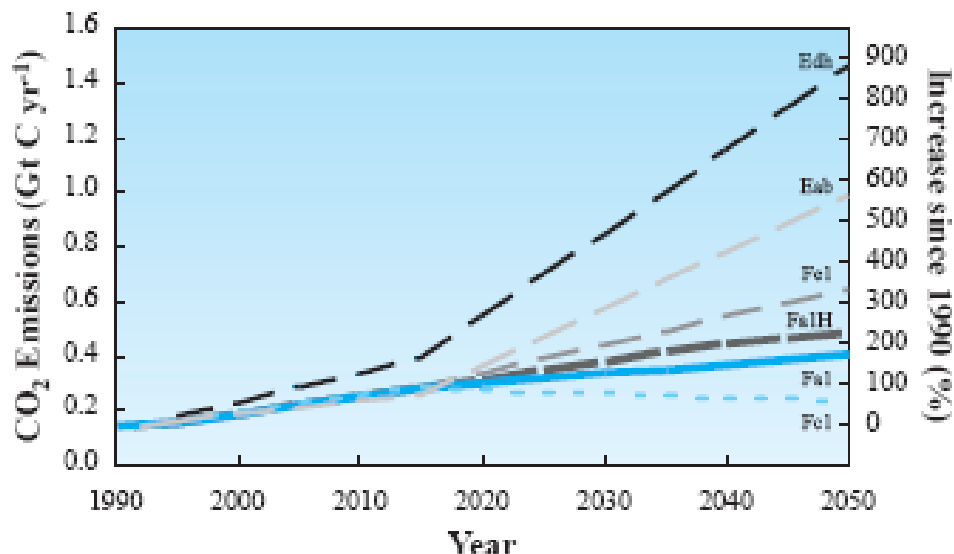
4.1.1. Ugljični dioksid (CO_2)

Utjecaj ugljičnog dioksida na klimatske promjene je izravan i ovisi o koncentraciji (CO_2) u atmosferi. Molekule ugljičnog dioksida apsorbiraju vanjsko infracrveno zračenje koje emitira zemljina površina i donji dio atmosfere.

Količina CO_2 koja nastaje izgaranjem goriva zrakoplova je određena ukupnim iznosom ugljika u gorivu jer je CO_2 nezaobilazan završni proizvod procesa izgaranja.

Promatrano povećanje koncentracije CO_2 od 25% - 30% CO_2 u proteklih 200 godina je uzrokovalo zagrijavanje troposfere i hlađenje stratosfere.

Za niz scenarija, porast ugljikovog dioksida do 2050 godine bio bi 1,6 do 10 puta vrijednosti istog u 1992. godini, slika 4.1.



Slika 4.1: Predviđano povećanja emisije CO₂ ,od 1990 do 2050 godine.

Izvor: IPCC special report AVIATION AND GLOBAL ATMOSPHERE

4.1.2. Vodena para

Pored izravnog utjecaja na efekt staklenika, koji je na granici tropopauze deset puta veći nego u donjim slojevima, onečišćenju vodene pare uvjetovanoj zračnim prometom pripada dodatno klimatsko djelovanje zbog tvorbe tzv. kondenzacijskih pruga koje pospješuju stvaranje visokih ledenih cirrus oblaka. Na polovima, gdje je granica troposfere na visini 8-9 km, zrakoplovi u režimu krstarenja redovito lete u sloju stratosfere, pri čemu je onečišćenje vodenom parom dvostruko štetno:

1. s jedne strane se manifestira u tvorbi polarnih stratosferskih oblaka koji utječu na razgradnju ozona
2. s druge strane se manifestira u kumulaciji cirrusa koji pojačavaju efekt staklenika. Izvori ocjenjuju udio zrakoplovne emisije H₂O u porastu naoblake u granicama 0,4 do 2%.

Količina vodene pare uzrokovane zrakoplovima zanemariva je u usporedbi s vodenom parom prenesenom isparavanjem sa zemlje, ali je znakovito da vodena para u stratosferi i na gornjoj granici tropopauze, gdje ujedno ima iznimno štetno djelovanje u usporedbi s ostalim stakleničkim plinovima, potječe isključivo od zrakoplova.

Većina emisije vodene pare kod podzvučnih zrakoplova emitirane su u troposferu gdje se, pomoću oborina, uklone unutar 1 do 2 tjedna. Manji dio emisije vodene pare je emitiran u području niže stratosfere, gdje se može nakupiti u veće količine. Budući da je vodena para staklenički plin, povećanje nakupljene količine može utjecati na zagrijavanje zemljine površine.

4.1.3. Dušikovi oksidi

Dušikovi oksidi (NO i NO₂) su prisutni u atmosferi. Vrlo su utjecajni u sastavu troposfere i stratosfere te su važni u procesu izgradnje i uništavanja ozona.

U višoj troposferi i nižoj stratosferi, zrakoplovne emisije NO_x uzrokuju povećanu količinu ozona. Tako da je povećana količina ozona koji je staklenički plin glavni problem zrakoplovne emisije NO_x, podzvučnih zrakoplova.

Također, primjećuje se i utjecaj na ostale elemente atmosfere. Glavni od tih utjecaja NO_x na atmosferu je povećanje koncentracije metana, još jednog stakleničkog plina.

Zrakoplovne emisije NO_x su efikasnije u stvaranju ozona u gornjoj troposferi obzirom na stvaranje istog, u istoj količini emisije, na površini. Također, povećanje količine ozona u gornjoj troposferi mnogo učinkovitije djeluje na *radiative forcing* nego što isto djeluje na nižim visinama. Pretpostavlja se da se najveće povećanje koncentracije ozona događa u blizini tropopauze, gdje je prirodna promjenjivost visoka.

Veliki naponi u smanjenju ispuštanja CO, HC i C imali su za posljedicu porast ispuštanja NO_x, koji je među svima njima najopasniji i najštetniji. NO_x nastaje kao rezultat izgaranja goriva na vrlo visokim temperaturama.

U nižim atmosferskim slojevima stvara fotosmog i ozon, a u stratosferi, gdje inače lete nadzvučni zrakoplovi, izaziva oštećenje prirodnog ozonskog sloja. NO_x doprinosi i pojavi kiselih kiša.

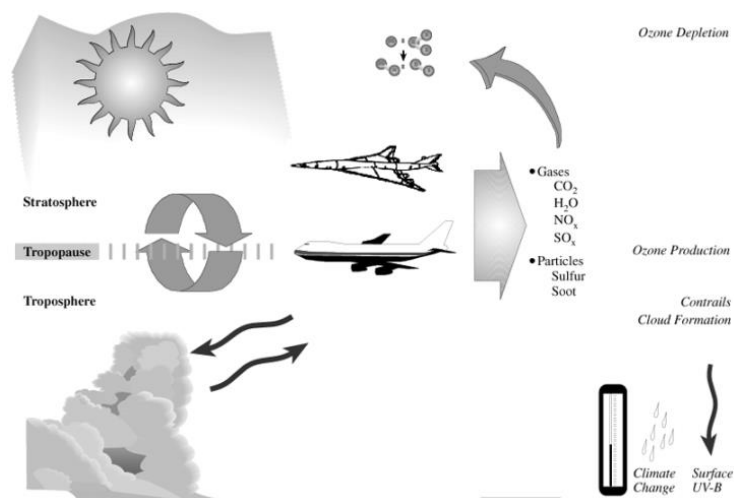
NO_x onečišćenje ima posredno klimatsko djelovanje u povećanju ozonskog sadržaja u području tropopauze zbog lančane fotokemijske reakcije s CH₄, CO i OH.

4.1.4. Sumporovi oksidi

SO₂ - emisije zrakoplova također imaju posredno klimatsko djelovanje jer pridonose razgradnji ozona, a u posljednjih 20 godine bilježi se godišnji porast od 5% njegove stratosferske koncentracije.

4.2. Utjecaj ispušnih plinova na atmosferu i ljude

Zrakoplovima uvjetovano onečišćenje atmosfere najintenzivnije je na sjevernoj hemisferi, osobito iznad europskog i američkog kontinenta kao i na glavnim zračnim koridorima preko Atlantika i Pacifika. Znakovit je porast NO_x koncentracija na srednjim geografskim širinama sjeverne polutke, gdje je udjel zrakoplova kvantificiran s 40%. (i više)



Slika 4.2.: Utjecaj zrakoplovstva na atmosferu

Izvor: http://www.grida.no/publications/other/ipcc_sr/?src=/climate/ipcc/aviation/index.htm

4.2.1. Glavni ekološki kriteriji vezani za međunarodno komercijalno zrakoplovstvo

Glavni ekološki kriteriji vezani za međunarodno komercijalno zrakoplovstvo su:

- zrakoplovna buka
- emisija plinova zrakoplovnih motora
- manipulacija otpadnim materijalom
- onečišćenje zemlje i vode u zračnim lukama

4.2.2. Tri glavne indikacije utjecaja antropogenih onečišćivača na globalnu ekološku ravnotežu

Štetno djelovanje antropogenih onečišćivača kojima pripadaju suvremeni zrakoplovi ne očituje se samo regionalno, nego u znatnoj mjeri utječe na globalnu ekološku ravnotežu u tri glavne indikacije:

1. promjena bilance zemljine radijacije zbog antropogenog (čovjekovog) efekta staklenika, što je povezano s promjenom globalne klime odnosno globalnim zagrijavanjem nižih slojeva troposfere
2. promjena ozonskog sadržaja atmosfere, koji s jedne strane, utječe na intenzitet zračenja na zemljinu površinu i filtriranje štetnog UV-zračenja, a s druge strane, ozon predstavlja važan staklenički plin
3. promjena oksidacijskog kapaciteta atmosfere zbog povećanja troposferske koncentracije ozona te utjecajem na bio-geo-kemijsku cirkulaciju ostalih, ekološki važnih, supstancija u tragovima.

4.2.3. Potencijalne klimatske promjene uzrokovane zrakoplovstvom

4.2.3.1. Kisele kiše

Spojevi koji nastaju pri procesima izgaranja kao što su sumporov dioksid, dušikovi oksidi i drugi plinovi pospješuju nastajanje kiselina. Takvi slobodni nemetalni oksidi oksidiraju u vlažnoj atmosferi sa vodenom parom u sumpornu i dušičnu kiselinu. Ove tvari se otopljene nalaze u zraku tako da onda na zemlju padaju sa padalinama.

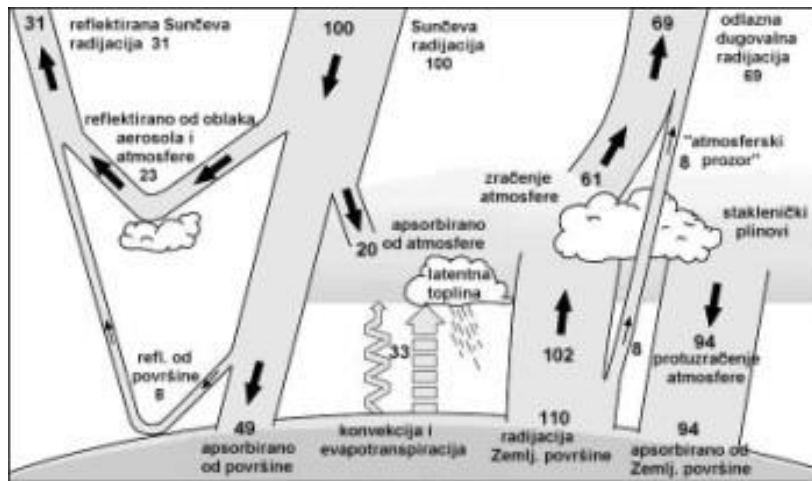
Kisela kiša je padalina zagađena sumporovim dioksidom, dušikovim oksidima, amonijakom i drugim kemijskim spojevima.

Ako pH vrijednost u inače jako čistim brdskim potocima i jezerima prijeđe u kiselo područje može doći do izumiranja riba i drugih organizama. Dospije li kisela kiša u tlo oslobađaju se teški metali koji mogu opteretiti podzemne vode, a time i pitku vodu. Na taj način se čovjek izlaže pojačanom unošenju teških metala u organizam. Ispitivanja pokazuju da sumporna i dušična kiselina snose najveću odgovornost za kiselost kiše.

4.2.3.2. Efekt staklenika

Na slici 5.2. prikazan je i objašnjen naziv „staklenika“.

Gomilanjem plinova CO₂ u atmosferi može doći do globalnih klimatskih promjena. CO₂ se u zemljinoj atmosferi se nagomilao upravo uslijed izgaranja fosilnih goriva. Inače, CO₂ je važan regulator Zemljine atmosfere: on održava temperaturni balans i kontrolira vrijeme i klimu. Premda je to bezbojan, proziran plin i kao takav propušta sunčevo svjetlo do površine zemlje, on sprečava zračenje zemljine toplinske energije u svemir. “Zarobljavanjem” toplinske energije CO₂ omogućava zagrijavanje površine Zemlje i nižih slojeva atmosfere, a time i opstanak sadašnjeg živog svijeta. Prisustvom CO₂ (i nekih drugih plinova: CH₄, NH₃...) dolazi do neke vrste “ionskog pojasa”, koji stvara efekt staklenika, slika 4.3.



Slika 4.3. Efekt staklenika

<http://www.geografija.hr/svijet/efekt-staklenika-i-kyotski-protokol-1-dio/>

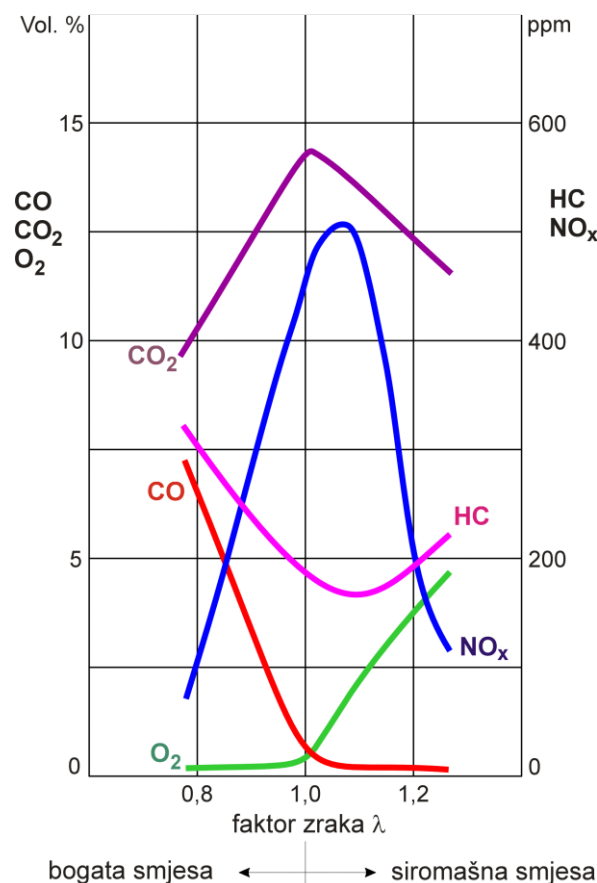
5. MJERE ZA SMANJENJE ONEČIŠĆENJA ISPUŠNIM PLINOVIMA

5.1. Klipni motori

Samo športski, školski i mali poslovni zrakoplovi kao pogon koriste klipni motor i to uglavnom Otto motor, a vrlo rijetko Diesel motor.

Zbog malog broja zrakoplova s klipnim motorom, onečišćenje atmosfere ispušnim plinovima zrakoplovnih klipnih motora je neznatno. Zbog navedenoga, za razliku od primjerice automobilskih motora, količina štetnih ispušnih plinova zrakoplovnih klipnih motora nije ograničena propisima.

Budući da zrakoplovni klipni motori nemaju ograničenja u pogledu sastava ispušnih plinova, oni ne koriste katalizatore ili neke druge pomoćne sustave za smanjenje koncentracije štetnih sastojaka (kao primjerice automobilski motori). Zbog toga, sastav ispušnih plinova zrakoplovnog klipnog Otto motora najviše ovisi od faktora zraka λ . Na slici 5.1. je prikazan utjecaj faktora zraka na sastav ispušnih plinova.

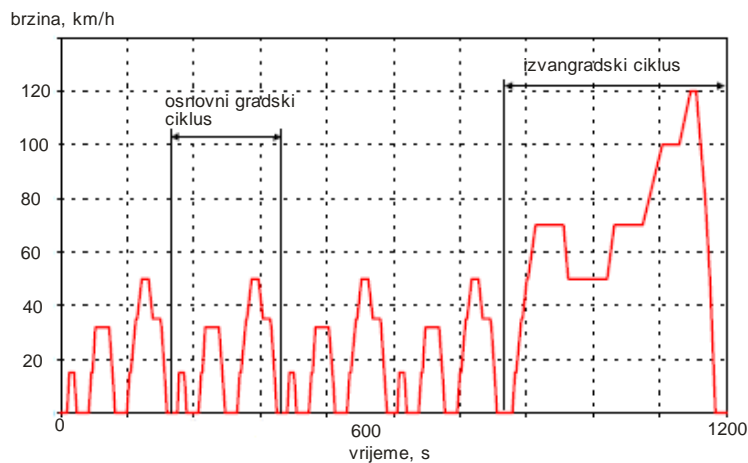


Slika 5.1. Utjecaj faktora zraka na sastav ispušnih plinova Otto motora

Zrakoplovni klipni motor gotovo uvijek rade u području bogate smjese pa se na temelju dijagrama na slici 5.1. mogu očekivati visoke koncentracije CO i HC.

Kod **automobilskih motora i općenito za cestovna motorna vozila**, propisima se ograničava količina CO, NO_x i HC za Otto motore, a kod Diesel motora još i količina čestica, odnosno dimnost.

Za motore za cestovna motorna vozila, standarde u pogledu emisije koji moraju zadovoljiti novi motori koji se proizvode, definiraju se tzv. **EU direktivama** (*European Union Directives*). Prema dopuštenoj razini koje pojedine direktive određuju, te razine/standarde označavamo kao Euro 1,...Euro 6. Trenutno je na snazi Euro 5 standard. Dopuštena razina pojedinog ispušnog plina propisuje se u gramima po prijeđenom kilometru puta (g/km), a ispitivanje se provodi u tzv. Euro-testu koji simulira gradsku i izvangradsku vožnju, slika 5.2.



Slika 5.2. Euro-test

Test traje oko 1200 s, a tijekom testa koncentracije pojedinih plinova po prijeđenom kilometru ne smiju preći granicu prikazanu u tablici 5.1.

Tablica 5.1.

European emission standards for passenger cars (Category M_1^*), g/km

Tier	Date	CO	HC	NO _x	HC+NO _x	PM
Diesel						
EM1	January 1989	2.72 (3.16)	-	-	0.97 (1.13)	0.14 (0.18)
Euro 2, IDI	January 1993	1.0	-	-	0.7	0.08
Euro 2, DI	January 1993	1.0	-	-	0.9	0.10
Euro 3	December 1997	0.64	-	0.50	0.56	0.05
Euro 4	January 2003	0.50	-	0.25	0.30	0.025
Euro 5	September 2009	0.50	-	0.18	0.23	0.005
Euro 6 (future)	September 2014	0.50	-	0.08	0.17	0.005
Petrol (Gasoline)						
EM1	January 1989	2.72 (3.16)	-	-	0.97 (1.13)	-
Euro 2	January 1993	2.2	-	-	0.5	-
Euro 3	January 1997	2.30	0.20	0.15	-	-

Euro 4	January 2003	1.0	0.10	0.08	-	-
Euro 5	September 2009	1.0	0.10	0.06	-	0.005**
Euro 6 (future)	September 2014	1.0	0.10	0.06	-	0.005**

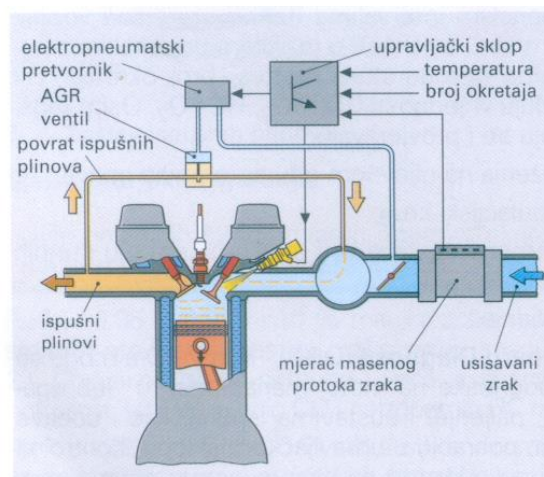
* Before Euro 5, passenger vehicles > 2500 kg were type approved as [light commercial vehicle](#) N1 - I

** Applies only to vehicles with direct injection engines

Dostizanje tako male razine kontroliranih komponenti ispušnih plinova, nemoguće je bilo postići samo konstrukcijskim rješenjima u smislu upravljanja procesom izgaranja (kvaliteta smjese, početak izgaranja, oblik prostora izgaranja itd.) već su se morale kod Otto motora uvesti i sljedeći mjere:

- primjena odgovarajućih goriva, tzv. bezolovnih benzina s malom količinom sumpora,
- naknadnom obradom ispušnih plinova: uporaba katalizatora, povrat plinova i uvođenje sekundarnog zraka.

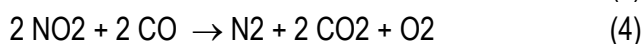
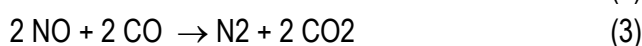
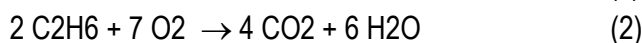
Povratom ispušnih-inertnih plinova u usisnu granu smanjuje se temperatura izgaranja, a pri nižim temperaturama izgaranja smanjuje se mogućnost stvaranja dušikovih oksida (NOx). Na slici 5.3. je prikazan sustav za povrat plinova. Količina povratnog plina regulira se preko tzv. EGR (eng.) ili AGR (njem.) ventila.



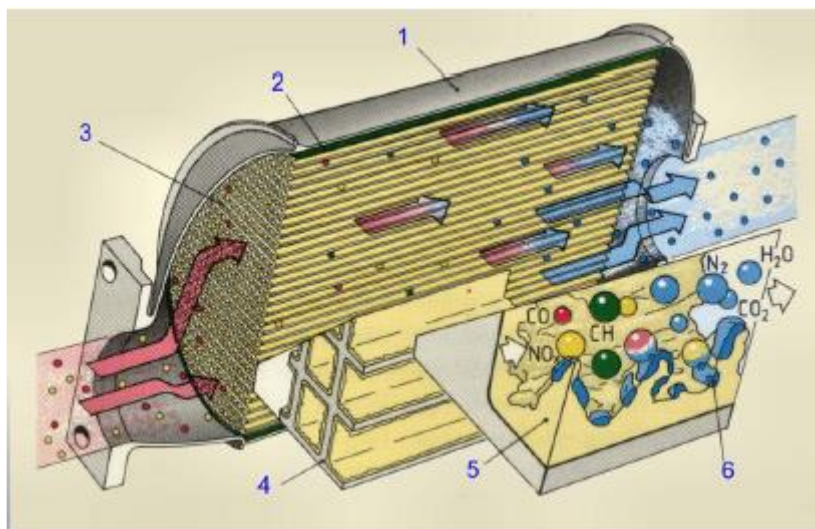
Slika 5.3. Povrat ispušnih plinova

Današnji katalizatori za benzinske motore (s indirektnim ubrizgavanjem goriva, tj. s ubrizgavanjem goriva ispred usisnog ventila) su u obliku jednostrukog katalizatora s trostrukim djelovanjem (*Three Way Catalyst* – *TWC*). To znači da je sav katalitički materijal smješten u jednom kućištu, a da se u njemu obavlja pretvorba tri štetna ispušna plina - CO, HC i NOx, a kao rezultat te pretvorbe se dobije H₂O, CO₂ i N₂.

Pretvorba štetnih plinova odvija se prema sljedećim pojednostavljenim kemijskim formulama:



Štetne komponente se pretvaraju u dvije faze: Prvo CO i HC oksidiraju u CO₂ i H₂O (formule 1 i 2). Kisik potreban za oksidaciju (**oksidacijski proces**) u ovom procesu je dostupan u ispušnom plinu u kojem uvijek ima nešto preostalog kisika kao posljedica nesavršenog izgaranja ili isti nastaje u procesu redukcije (**redukcijski proces**) dušikovih oksida (formula 3 i 4). Katalizator trostrukog djelovanja izrađen je u obliku sačaste keramičke ili rjeđe metalne strukture kroz koju struji ispušni plin, slika 5.4. Na keramiku ili metal obvezno se nanosi sloj aluminijskog oksida koji povećava aktivnu površinu preko koje struji ispušni plin. Na takav način se povećava aktivna površina katalizatora za nekoliko tisuća puta. Na kraju dolazi katalitički sloj. Kod običnih oksidacijskih katalizatora za katalitički sloj se upotrebljavaju plemeniti materijali platina ili paladij. Kod katalizatora s trostrukim djelovanjem još se upotrebljava i rodij. Količina plemenitih metala u jednom katalizatoru iznosi od 1 do 3 grama, ovisno o zapremini motora, odnosno zapremini katalizatora.



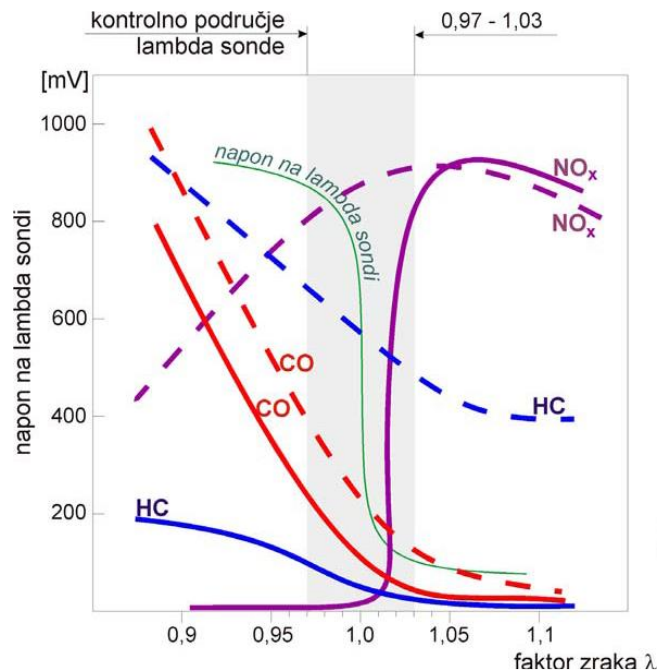
Slika 5.4. Presjek katalizatora: 1 - ispušni lonac; 2 - kompenzacijski sloj između lonca i katalizatora; 3 - katalizator; 4 - keramički ili metalni nosač; 5 - sloj aluminijskog oksida kojim se povećava površina katalizatora; 6 - plemeniti katalitički metali (platina, paladij, rodij)

Da bi katalizator dobro obavljao svoju funkciju potrebno je zadovoljiti nekoliko uvjeta:

Motor opremljen katalizatorom mora raditi s bezolovnim gorivom. Naime, olovo iz goriva trajno uništava plemenite metale u katalizatoru.

Kako bi pretvorba ispušnih plinova u katalizatoru bila optimalna, smjesa goriva i zraka mora biti u području oko $\lambda \approx 1$, što znači da je kvalitet smjese potrebno stalno mjeriti senzorom (tzv. lamda sonda) i računalom upravljati spravljanje smjese unutar uskog područja efikasnost pročišćavanja, slika 5.5. Raniji, tzv. neregulirani katalizatori, koji nisu imali regulaciju smjese uz pomoć lamda-sonde, imali su i efikasnost pretvorbe u prosjeku oko 60%, za razliku od reguliranih katalizatora koji imaju efikasnost oko 94-98%, što uznači da svega 2-6% štetnih plinova ostane nepretvoreno.

Lamda sonda je senzor koji posredno mjeri faktor zraka tako da proizvodi odgovarajući naponski signal u ovisnosti od slobodnog kisika u ispušnom plinu.



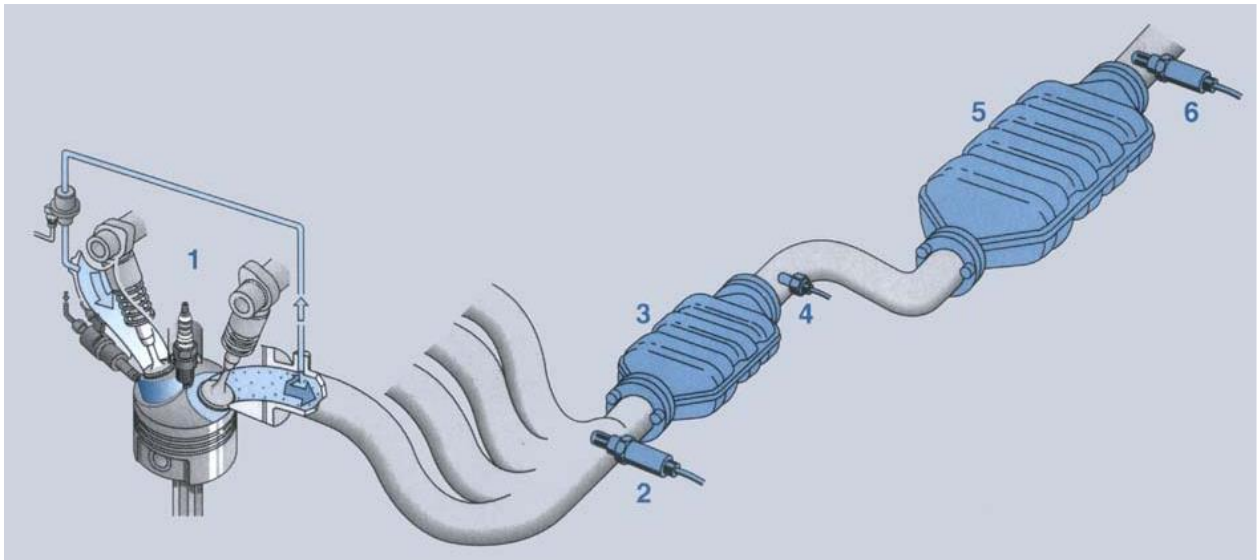
Slika 5.5. Efikasnost pročišćavanja katalizatora: --- prije katalizatora; — nakon katalizatora

Katalizator mora biti zagrijan na optimalnu radnu temperaturu koja se kreće u rasponu od 400 do 800°C. Stoga se katalizatori postavljaju što bliže motoru kako bi hladna faza rada trajala što kraće. Ako se katalizator zagrije na više temperature od 800 ili 1000°C dolazi do uništenja katalizatora.

Novi standardi zahtijevaju i ugrađenu kontrolu rada katalizatora tijekom životnog vijeka, tzv. *OBD - On-board Diagnostic*. U tu svrhu se obvezno ugrađuje i druga lamda sonda. Ona se postavlja iza katalizatora i ima funkciju kontrole procesa pročišćavanja ispušnih plinova.

Postoje **Otto motori** i s tzv. **direktnim ubrizgavanjem** goriva (*Gasoline Direct Injection – GDI*), tj. gorivo se ubrizgava u cilindar. Takvi motori u području malih opterećenja rade s izrazito siromašnom smjesom

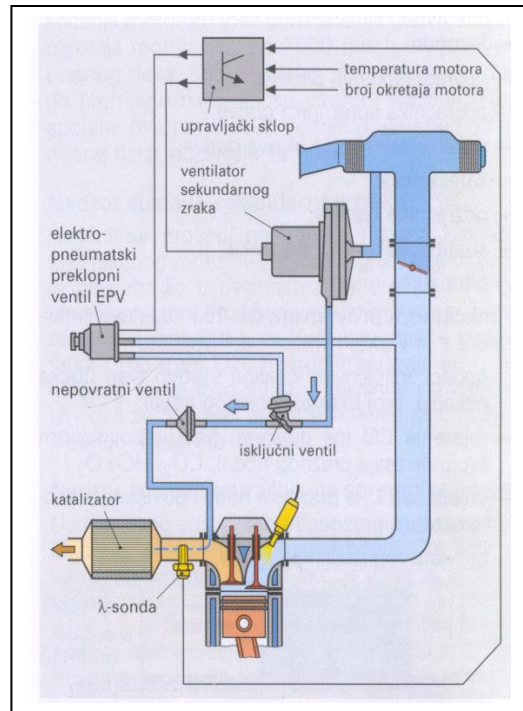
GDI motori su opremljeni drugačijim sustavom pročišćavanja ispušnih plinova od predhodno opisanog. Da bi pročišćavanje ispušnih plinova bilo efikasno i u području rada sa siromašnom smjesom (u području manjih, tj. parcijalnih opterećenja) kod benzinskih motora s direktnim ubrizgavanjem potrebno je ugraditi poseban NOx katalizator (*NOx absorber*) koji će dodatno reducirati NOx u ovoj fazi rada motora. Ovaj katalizator ima mogućnost vezivanja-pohranjivanja NOx u sebi za vrijeme rada sa siromašnom smjesom (zbog toga i naziv akumulatorski katalizator), a kad se napuni, motor radi sa stehiometrijskom smjesom i omogućava razlaganje NOx. Za vrijeme rada motora sa stehiometrijskom smjesom, dva katalizatora rade paralelno.



Slika 5.6.: Ispušni sustav benzinskog motora s direktnim ubrizgavanjem benzina. 1 – motor s direktnim ubrizgavanjem benzina; 2 - prva, upravljačka lambda sonda; 3 – katalizator trostrukogdjelovanja (predkatalizator); 4 – temperaturna sonda; 5 – NOx akumulatorski katalizator (glavni katalizator); 6 – kontrolna lambda sonda u kojoj eventualno može biti integriran i NOx senzor

Sposobnost akumuliranja NOx-a u ovom tipu katalizatora je ovisna o temperaturi. Najveća absorpcija NOx-a je između 300 i 400°C . Budući da su radne temperature ovakvih katalizatora različite, oni su smješteni u odvojena kućišta. Katalizator trostrukog djelovanja, koji radi na većim temperaturama, se postavlja bliže motoru, a NOx akumulatorski katalizator se postavlja ispod vozila (na niže temperature). Prvi katalizator se ponekad naziva “predkatalizator”, a drugi katalizator se ponekad naziva “glavni katalizator”. Sustavom upravlja računalo i u odnosu na motore s indirektnim ubrizgavanjem, sustav obično ima dodatni senzor NOx i lambda sondu, slika 5.6..

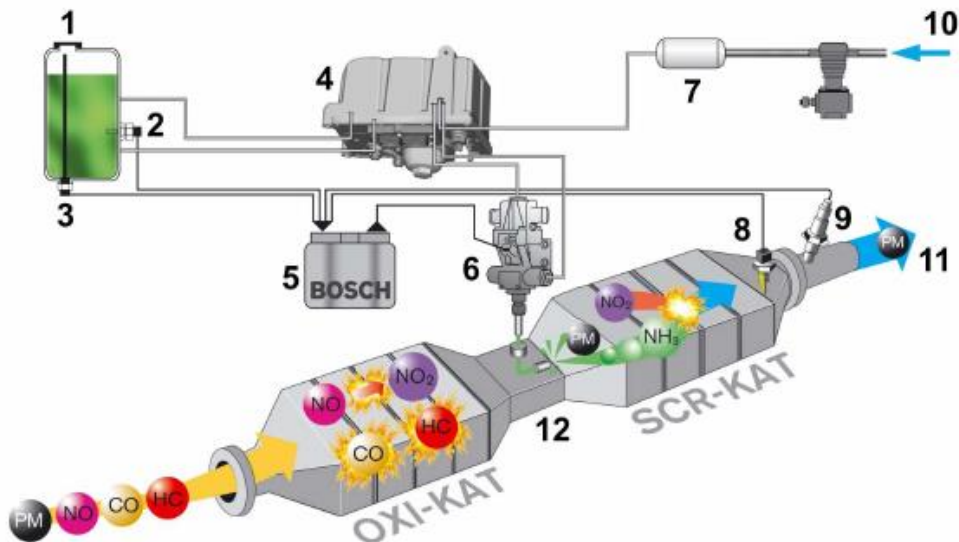
Kod ovakvih akumulatorskih katalizatora, najveća opasnost za ispravan rad je sumpor u gorivu. Sumpor iz goriva reagira s aditivom iz katalizatora-barijem stvara barijev sulfat. Kao rezultat tog kemijskog procesa je smanjena mogućnost absorpcije NOx-a. Barijev sulfat je vrlo otporan na visoke temperature i tek iznad 600 do 650°C ponovno prelazi u barij. Postizanje ovako visokih temperatura u ispuhu postiže se posebnim programom ubrizgavanja goriva kojim upravlja računalo na osnovi informacija s NOx senzora. Ovaj način rada naziva se slojevito punjenje za zagrijavanje katalizatora.



Slika 5.7.a): Uvođenje sekundarnog zraka

Na slici 5.7. prikazan je sustav za upuhivanje sekundarnog zraka u ispušnu cijev. Naknadnim izgaranjem zraka u ispušnoj cijevi se smanjuje koncentracija HC i CO i to u fazi hladnog starta i zagrijavanja motora, jer u ovom režimu katalizator još nije postigao radnu temperature pa ne obavlja pretvorbu.

U odnosu na Otto motore, Diesel motori imaju u ispuhu više NO_x i krutih čestica koje se uočavaju kao dim. Kod Otto motora, zbog načina izgaranja (homogena smjesa) krute čestice su zanemarive. U literaturi se taj dio štetnih tvari naziva *Particulate Matters* – PM, a mogu se opisivati i preko faktora dimnosti *Smoke Number*- SN.



Slika 5.7.b): Shema sustava za pročišćavanje ispušnih plinova Diesellovog motora Euro 5:

1-spremnik otopine uree (AdBlue), 2-senzor temperature, 3-senzor napunjenosti spremnika, 4-dobavni modul, 5-upravljački uređaj, 6-modul za doziranje, 7-spremnik zraka, 8-senzor temperature, 9-senzor ispušnih plinova, 10-dovod zraka, 11-pročišćeni ispušni plinovi, 12-cijev raspršivača

Mjere za smanjivanje štetnih sastojaka kod Diesel motora su:

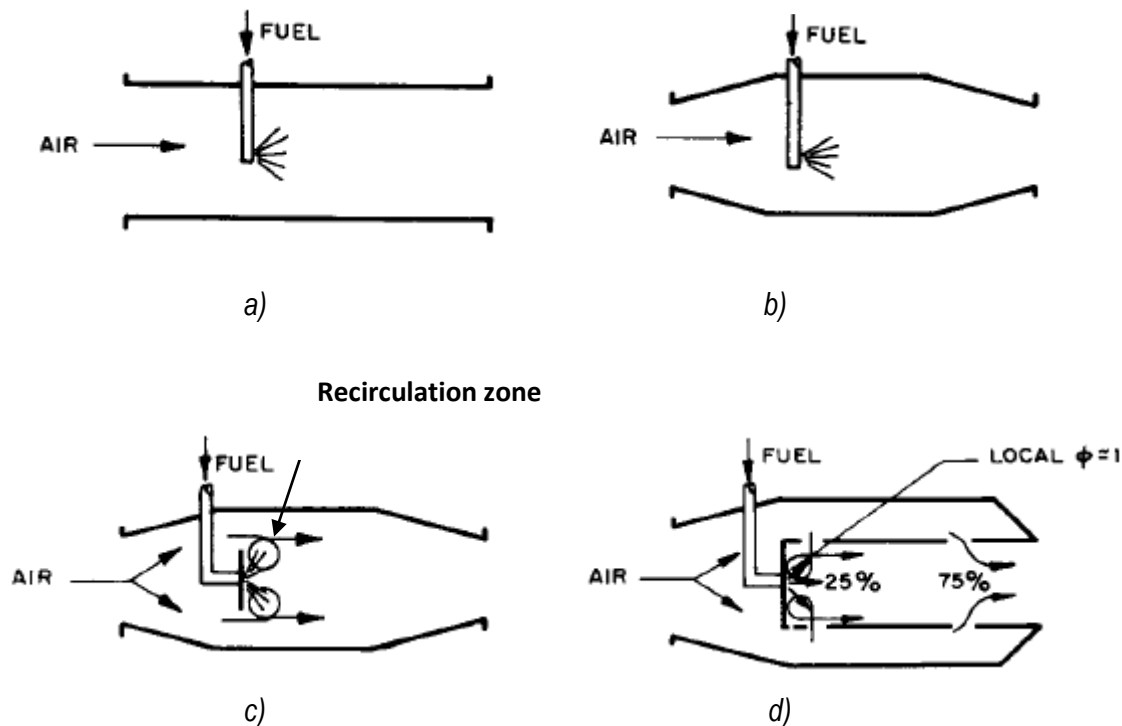
- Povrat ispušnih plinova radi smanjivanja NOx.
- U novije vrijeme za smanjenje NOx primjenjuje se tzv. selektivna katalitička redukcija (*Selective Catalytic Reduction –SCR*) koja omogućava pretvorbu NOx spojeva u dušične spojeve u uvjetima ispušnih plinova bogatih kisikom (Diesel motori rade uvijek u područja siromašne smjese). U tzv. SCR-u koristi se amonijak koji u reakciji sa dušičnim oksidom reagira tako da se stvara dušik i voda. Takvi katalizatori moraju imati poseban spremnik u kojima se nalazi tvar iz koje se generira amonijak, npr .otopina uree (*AdBlue*), slika 5.7.b.
- Uvođenje oksidacijskog katalizatora za pretvaranje HC i CO u CO₂ i H₂O
- Uvođenje pročišćavača za čestice čađe (DPF) koji skuplja krute čestice i naknadno ih spaljuje.

5.2. Mlazni motori

5.2.1. Komora izgaranja

Izgaranje goriva u mlaznim motorima obavlja se u komori izgaranja (*Combustion Chamber, Combustor*). Goriva smjesa se pri pokretanju motora pali svjećicom (koja se nakon pokretanja isključuje), a nakon toga gorivo se kontinuirano ubrizgava u plamen u komori.

Na slici 5.8. je prikazana geneza nastanka današnje konstrukcije tzv. konvencionalne komore izgaranja za plinske turbine, odnosno mlazne motore.



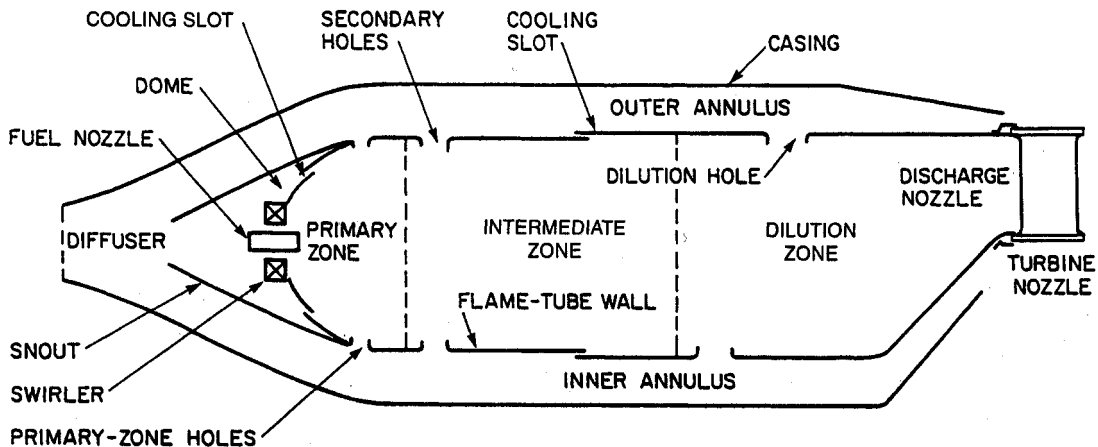
Slika 5.8. Razvojni putevi konvencionalne komore izgaranja

Teoretski, komora bi mogla izgledati kao cijev između kompresora i turbine, slika 5.8.a). Međutim, ta geometrija je nepraktična zbog velike brzine zraka koja bi dolazila u prostor izgaranja iz kompresora (oko 150 m/s). S tom brzinom zraka nemoguće je ostvariti stabilizaciju izgaranja i uzrokuje veliki pad tlaka zbog izgaranja (pad tlaka, tj. otpori strujanja su proporcionalni kvadratu brzine). Da bi se smanjila brzina zraka, zrak najprije prolazi kroz difuzor gdje mu se brzina smanji oko 5 puta, tj. na oko 30 m/s, slika 5.8.b). To je još uvijek velika brzina za stabilno izgaranje, pa se postavlja pregrada ili neka prepreka (*baffle*, *bluff-body*) koja ima za posljedicu da se iza te prepreke formira zona u kojoj je moguće stabilno formiranje plamena, odnosno izgaranje. Iza pregrade stvara se zona nižeg tlaka, pa se postiže zona povratnog strujanja svježeg zraka prema zoni gorenja i miješanje goriva i zraka, slika 5.8. c). Ovakva povratna strujanja mogu se postići ili pospješiti vihornicama (*swirl generator*), slika 5.9. Za stabilno izgaranje u ovim uvjetima, miješanje zraka i goriva mora biti blizu stehiometrijskog i u toj zoni temperatura je 2000 K ili više. Na lopatice turbine treba dovesti ispušni plin ohlađen na najviše 1850 K. To se može postići postavljanjem tzv. plamene cijevi (*liner*, *flame tube*) kojom se dovodi zrak za ohlađivanje produkata izgaranja, a istovremeno se omogućava izgaranje s smjesom u granicama upaljivosti, slika 5.8. d).

Na slici 5.9. je prikazana tipična konvencionalna komora za izgaranje. Osnovni zahtjevi koja mora zadovoljiti komora izgaranja današnjih mlaznih motora su:

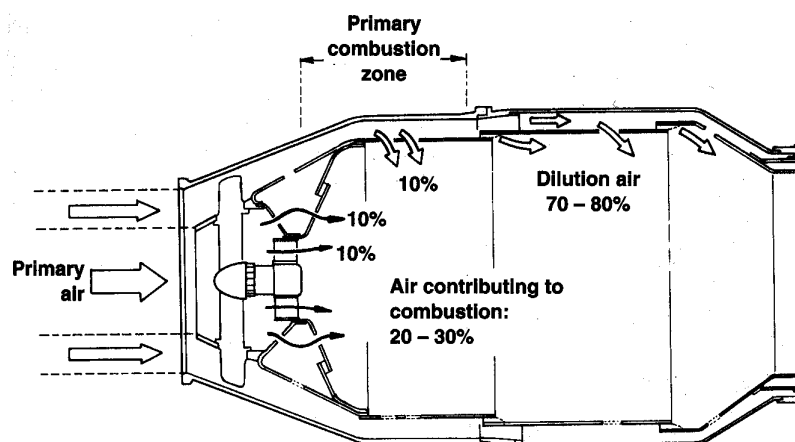
- Visoki koeficijenti iskoristivosti izgaranja, tj. ubrizgano gorivo mora u što većoj mjeriti izgorjeti i osloboditi toplinu.
- Pouzdano i kontinuirano izgaranje, na razini mora i na velikim visinama.
- Široko područje stabilnog izgaranja pri različitim tlakovima i bogatstvima smjese.
- Mali gubitci tlaka.
- Distribucija temperature na izlazu iz komore koja omogućava maskimalnu trajnost lopatica

- turbine.
- Niska razina štetnih plinova i dimnosti.
 - Odsustvo pulzacije tlaka.
 - Oblik prilagođen konstrukciji motora.
 - Konstrukcija prihvatljive cijene i lakog održavanja.
 - Trajnost.
 - Višegorivna svojstva.



Slika 5.9. Konvencionalna komora izgaranja

U komori izgaranja se mogu izdvojiti tri zone: primarna, prijelazna i zona miješanja. Osnovna funkcija primarne zone je da se osigura postojano gorenje, te da se osigura dovoljno vremena, temperatura i turbulencija kako bi se osiguralo kompletno izgaranje smjese goriva i zraka. Za ovu zonu je zajedničko za sve vrste komora, da se u toj zoni kreira toroidalno povratno strujanje i koje uvodi i recirkulira dijelove vrućih produkata izgaranja osiguravajući kontinuirano paljenje i izgaranje nadolazećeg zraka i goriva.



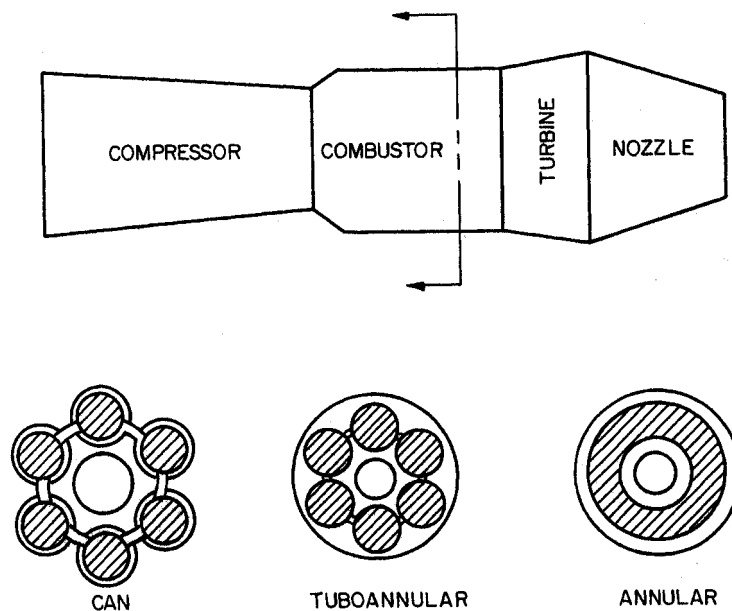
Slika 5.10. Stvaranje recirkulacije u primarnoj zoni pomoću vjehovih lopatica i dovođenjem zraka kroz otvore na plamenoj cijevi

Od dovedenog zraka u komoru izgaranja, samo oko 20-30% se dovodi u primarnu zonu za izgaranje.

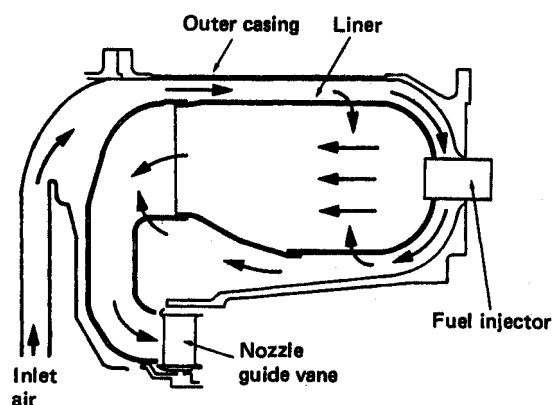
Budući da je u primarnoj zoni temperatura veća od 2000 K, zbog disocijacije javit će se značajna koncentracija CO i H₂. Ako bi se plinovi naglo ohladili s dovođenjem veće količine zraka, tada bi se "zamrznuli" gore spomenuti plinovi. Da bi ovi plinovi mogli naknadno oksidirati, treba im omogućiti vrijeme za oksidaciju, a i temperatura se ne smije naglo smanjiti. Za to služi prijelazna zona.

U trećoj zoni ostvaruje se miješanje zraka i plinova izgaranja tako da se ostvari profil temperature pogodan za lopaticu turbine.

Glavne vrste komora izgaranja prikazane su na slici 5.11.



Slika 5.11. Vrste komora izgaranja zas mlazne motore



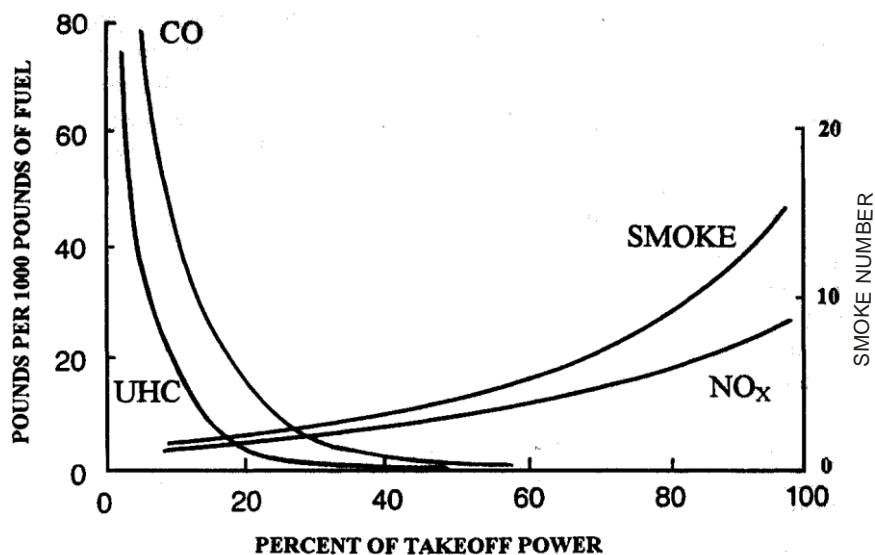
Slika 5.12. Komora s povratnim strujanjem

2.2.2. Mehanizmi nastajanja štetnih spojeva u komori izgaranja

Da bi se adekvatno mogli "boriti" protiv velike koncentracije nepoželjnih plinova, prije svega mora se znati mehanizam njihovog nastanka i režimi rada motora u kojima su te koncentracije kritične.

2.2.2.2. Tipična karakteristika emisije ispušnih plinova

Poznavajući način rada, odnosno odvijanje procesa izgaranja u komori izgaranja mlaznih motora, općenito se može reći da konvencionalna komora izgaranja na malim opterećenjima producira više koncentracije CO i UHC koje se sve više smanjuju povećanjem opterećenja. Na većim opterećenjima, povećava se pak koncentracija NO_x i raste dimnost.



Slika 5.12. Utjecaj opterećenja na koncentracije štetnih ispušnih plinova

2.2.2.3. Nastajanje CO

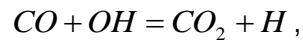
U prosjeku, izgaranje goriva u mlaznim motorima odvija se s visokim prosječnim vrijednostima λ (siromašna smjesa), ali je u predhodnom poglavlju opisano da se proces izgaranja izvodi pretežito u primarnoj zoni komore izgaranja gdje mogu vladati bitno različiti uvjeti od prosječnih vrijednosti.

Ugljični monoksid je produkt nekompletnog izgaranja, a ono može biti uzrokovano:

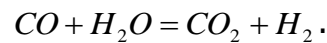
- prebogata smjesa ili prekratko vrijeme izgaranja u primarnoj zoni komore izgaranja,
- nedakvatno miješanje goriva i zraka zbog čega nastaju zone prebogate smjese,
- hlađenje produkata izgaranja, posebno u primarnoj zoni uvlačenjem zraka za hlađenje.

Načelno, moguće je reducirati CO formiran u primarnoj zoni postupnim dovođenjem zraka, odnosno postupnim hlađenjem. Iako, jednom formiran CO je prilično otporan na oksidaciju.

Na višim temperaturama, oksidacija CO se odvija prema:



a na nižim temperaturama:



Glavni utjecajni čimbenici na količinu CO mogu se navesti kao sljedeći:

- pretičak zraka u primarnoj zoni komore izgaranja,
- tlak u komori izgaranja,
- ulaznu temperaturu zraka u komoru izgaranja i
- prosječni promjer kapljica ubrizganog goriva.

Napomena:

Već je rečeno da se sastav smjese najčešće definira tzv. faktorom zraka ili pretičkom zraka koji označavamo s λ :

$$\lambda = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_{steh}},$$

gdje je:

- \dot{m}_a - stvarana količina zraka dovedena za izgaranje 1 kg goriva,
- \dot{m}_{steh} - stehiometrijska količina zraka potrebna za izgaranje 1 kg goriva.

Kad je $\lambda = 1$, smjesa je stehiometrijska, za $\lambda < 1$ smjesa je bogata, a kad je $\lambda > 1$ smjesa je siromašana.

Naročito u američkoj literaturi, za sastav mješavine goriva i zraka, koristi se tzv. *equivalence ratio* Φ koji se definira kao:

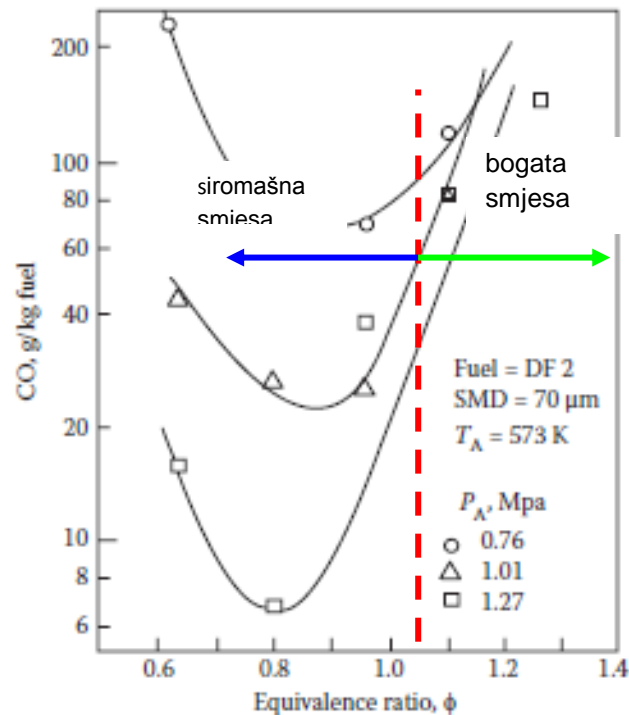
$$\Phi = \frac{FAR}{FAR_{steh}},$$

gdje je FAR maseni odnos goriva i zraka. To znači, za stehiometrijsku smjesu $FAR \approx 1/15 = 0,067$.

Kod ovog načina označavanja vrijedi: kad je $\Phi = 1$, smjesa je stehiometrijska, kad je $\Phi < 1$, smjesa je siromašana, a kad je $\Phi > 1$, smjesa je bogata.

Također proizlazi da je:

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



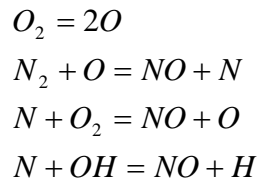
Slika 5.13. Utjecaj sastava smjese i ulznog tlaka zraka P_A na koncentraciju CO: ulazna temperatura zraka- T_A , promjer kapljica goriva – SMD, gorivo, FUEL DF2- gorivo za dieslove motore

Iz dijagrama se vidi da se koncentracija CO smanjuje povećanjem ϕ , te da se minimum dostiže u području od oko $\phi \approx 0,8$. Daljnje povećanje ϕ ima za posljedicu povećanje koncentracije CO. Visoka koncentracija CO u području niskih ϕ je posljedica usporavanja oksidacije zbog smanjene temperature izgaranja. Povećanje ϕ , povećava se temperatura izgaranja, što ubrzava brzinu oksidacije čime se smanjuje koncentracija CO. Ipak, na temperaturama većim od oko 1800 K produkcija CO postaje značajna zbog početka disocijacije CO_2 .

2.2.2.4. Nastajanje NOx spojeva

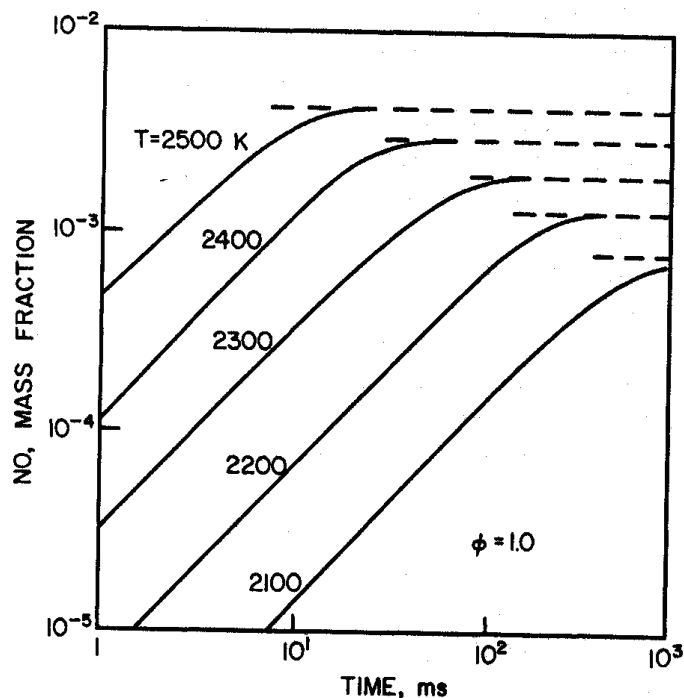
Kao produkti izgaranja u ispušnim plinovima nastaju NO i NO_2 oksidi koje zajednički označavamo NOx spojevi. NOx spojevi mogu biti producirani tijekom procesa izgaranja na četiri različita načina: kao termički NOx (*Thermal NOx*), kao promptni NOx (*Prompt NOx*), kao gorivni NOx (*Fuel NOx*) i kao oksidacija dušika (*Nitrous Oxide Mechanism*).

Termički NOx (*Thermal NOx*). Nastaje kao produkt oksidacije atmosferskog dušika (dušika iz zraka) pri visokim temperaturama u procesu izgaranja ili postplamenim procesima izgaranja (*postflame gases*). Te su temperature iznad 1850 K. Pojednostavljeni mehanizam nastajanja NO spoja:



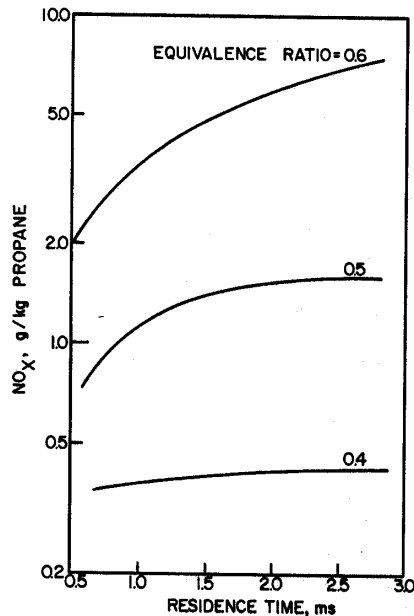
NO spojevi svoj maksimum dosežu na siromašnoj strani kvalitete smjese. To je posljedica "borbe" za kisikom između goriva i dušika. Budući da su temperature izgaranja veće na bogatoj strani kvalitete smjese, raspoloživi kisik se u tim uvjetima pretežito veže sa molekulama goriva.

Izraziti utjecaj temperature izgaranja na vrijednost termičkog NO je prikazan na slici 2.14. Koncentracija NO pada intenzivno kad se temperatura izgaranja (plamena) smanjuje, posebno kad je raspoloživi vrijeme izgaranja oko 5 ms.



Slika 5.14. Utjecaj temperature i vremena reakcije na koncentraciju Nox, $p=1$ MPa

Na slici 5.15. je prikazan utjecaj sastava smjese u slučaju tzv. predhodnog miješanja zraka i goriva (*premixed air-fuel system*) na formiranje NOx spojeva. Što je vrijeme reakcije duže, veća je količina NOx spojeva, osim ako je sastav smjese oko $\phi \approx 0,4$. Tada vrijeme reakcije nema utjecaj na količinu NOx spojeva. Ta spoznaja ima značajan utjecaj na razvoj konstrukcije komore izgaranja za razinu niskih NOx spojeva prema principu, tzv. *lean premixed combustors*.

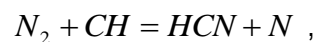


Slika 5.15. Utjecaj vremena reakcije i sastava smjese na formiranje Nox spojeva

Zaključno se može reći sljedeće u vezi formiranja termičkih NO_x spojeva:

- termički NO_x spojevi se značajno mogu kontrolirati pomoću temperature izgaranja, odnosno temperature plamena,
- samo male količine NO_x spojeva se formiraju na temperaturama ispod oko 1850 K,
- u uvjetima tipičnim za izgaranje u konvencionalnim komorama izgaranja (visoke temperature se u reakcijama dosežu samo nekoliko ms) NO_x se linearno povećava sa vremenom reakcije,
- Za vrlo siromašne smjese $\Phi < 0,5$ i predhodno izmješana smjesa goriva i zraka (*premixed fuel-air system*) formiranje NO_x ne ovisi bitno od vremena u zoni reakcije.

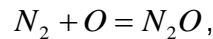
Promptni NO_x (*Prompt NO_x*). Nastaje kao produkt reakcije dušika i radikala ugljikovodika nastalih u plamenu. Aktivacijska energija ovih reakcija je mala, reakcije se odvijaju "promptno", radije u predplamenom području nego u plamenom ili postplamenom. Pojednostavljeno, inicijalna reakcija počinje:



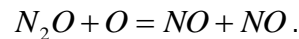
A nakon toga u određenim uvjetima (*lean premixed condition – LPM*) HCN oksidira u NO.

Gorivni NO_x (*Fuel NO_x*). Nastaje kao produkt reakcije dušika iz goriva u procesu izgaranja. Koncentracija dušika u tekućim gorivima (diesel goriva i kerozini, loživa ulja) su vrlo mala, reda veličina oko 0,1 % do oko 0,5%.

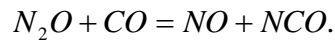
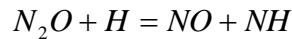
Oksidacija dušika (*Nitrous Oxide Mechanism*). Nastaje zbog sljedećih reakcija:



nakon čega slijedi formiranje NO prema:

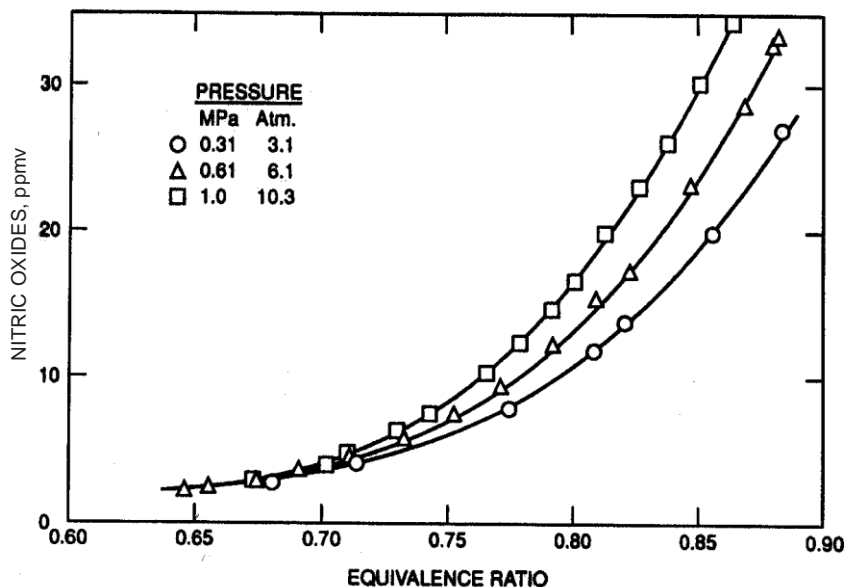


Moguće su i sljedeće reakcije:



Utjecaj tlaka na formiranje NOx spojeva

Važno je analizirati utjecaj tlaka zraka na ulazu u komoru izgaranja jer smo u zadnje vrijeme suočeni sa stalnim povećanjem tlaka zraka na ulazu u komoru izgaranja. Naime, znamo da je toplinski stupanj iskoristivosti plinske turbine to veći što je stupanj povećanja tlaka veći pa se tlak zraka u komori izgaranja stalno povećava. Sadašnji motori imaju stupanj povećanja tlaka oko 30.



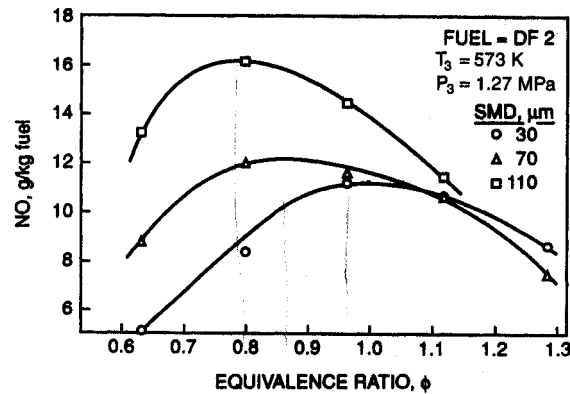
Slika 5.16. Utjecaj sastva smjese i tlaka zraka na formiranje NOx spojeva

Za konvencionalne komore izgaranja potvrđeno je da je količina NOx proporcionalna povećanju tlaku prema p^n , a n se kreće u granicama $n=0,5...0,8$.

Na slici 5.16. se vidi da je kod predhodno izmješane siromašne smjese tlak zraka nema utjecaja na formiranje NOx.

Utjecaj raspršivanje goriva na formiranje NOx spojeva

Eksperimenti pokazuju da povećanje prosječnog promjera kapljica ubrizganog goriva povećava i količinu NOx spojeva, a to je izraženije kod siromašne smjese, slika 5.17.



Slika 5.17. Utjecaj prosječne vrijednosti promjera kapljica goriva na formiranje NO_x

2.2.2.5. Nastajanje UHC (Unburned Hydrocarbons)

UHC (ponekad se označavaju samo kao HC) označavamo gorivo koje napušta komoru izgaranja u vidu kapljica goriva ili para goriva, ili u obliku produkata termičke degradacije goriva. UHC su obično povezani sa neadekvatnim raspršivanjem goriva, brzinom izgaranja, efektom hlađenja od zraka koji hladi stijenu komore ili kombinacijom ovih efekata.

Smatra se da oni čimbenici koji utječu na stvaranje CO, također utječu i na stvaranje UHC.

2.2.2.6. Nastajanje dimnosti

Uzrok dimnosti ispušnih plinova su sitne čestice čađi (*soot particle*). Sastav čestica čađi čine uglavnom ugljik (više od 90%) koji je nastao izdavanjem čvrstog ugljika- koksinih čestica u procesu izgaranja u zonama (oko kapljice goriva) jakog nedostatka kisika. Zbog navedenog, nastajanje sitnih čestica čađi ne može se predvidjeti kinetičkim i termodinamičkim proračunima, jer uglavnom ovisi od procesa raspršivanja i atomizacije goriva, te spravljanja smjese goriva i zraka. Uglavnom se analizira utjecaj tlaka, kvalitete goriva i kvaliteta raspršivanja kao mjerljivi čimbenici koji utječu na dimnost.

Utjecaj tlaka zraka

Problem sa nastajanjem čestica čađi je uvijek veći kod većih tlakova i to najvećim dijelom zbog utjecaja na karakteristiku raspršivanja goriva. Npr., kod predhodno pripremljene smjese (*premixed kerosine/air*) goriva i zraka, utvrđeno je se čestice čađi uopće ne formiraju na tlakovima ispod 0,6 MPa i kad je smjesa sastava $\Phi < 1,3$. Poznato je da homogena smjesa, npr. kod Otto motora također ne producira izgaranje s uočljivim česticama čađi.

Povećani tlak zraka najviše utječe na smanjeni doseg ubrizganog mlaza goriva. Kod manjeg tlaka, mlaz goriva se proteže kroz čitavu zonu izgaranja, dok pri većem tlaku raspršene kapljice goriva se koncentriraju bliže brizgaljke u zoni pogodnoj za formiranje čestica. Također negativan efekt je što povećani tlak reducira kut konusa mlaza goriva. To povećava mogućnost stvaranja čestica čađi, dijelom zbog povećanja promjera kapljica, a većim dijelom zbog povećanja bogatstva smjese u zoni mogućeg nastajanja čestica čađi.

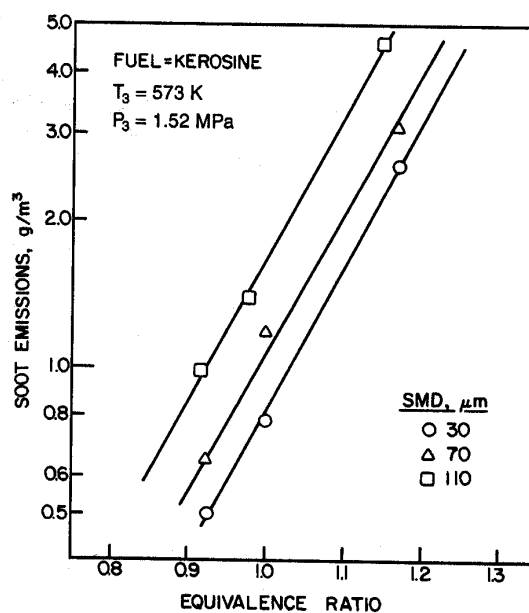
Utjecaj vrste goriva

Gorivo utječe na pojavu dimnosti na dva načina: preko kemijskog sastava goriva i preko fizikalnih svojstava. Od fizikalnih svojstava najvažnije su viskoznost i isparivost. Ova svojstva direktno utječu na promjer kapljica goriva, doseg mlaza goriva i brzinu isparavanja kapljice goriva.

Goriva za mlazne motore provjeravaju se na tzv. **točku dimljenja** (*Smoke Point*). Točka dimljenja je maksimalna visina plamena u milimetrima kod koje gorivo može izgarati bez čađenja u standardnoj (ispitnoj) svjetiljci.

Utjecaj kvalitete raspršivanja goriva

Općenito, manji promjer kapljice raspršenog goriva smanjuje pojavu dimnosti. Manja kapljica goriva ima mogućnost da kompletno ispari prije i onda počne izgarati u parovitom obliku (kao lokalno homogena smjesa), obrnuto, izgarat će u režimu bogate smjese i difuzijskog izgaranja.. Ali ako poboljšano raspršivanje goriva ide na račun smanjenja doseg mlaza goriva, može doći do povećanja pojave dimnosti zbog povećanja lokalne koncentracije goriva. U pravilu, smanjeni doseg mlaza goriva obično je i razlog povećanja dimnosti kod motora sa visokim stupnjem povećanja tlaka i koji su opremljeni sa duplex brizgaljkama.

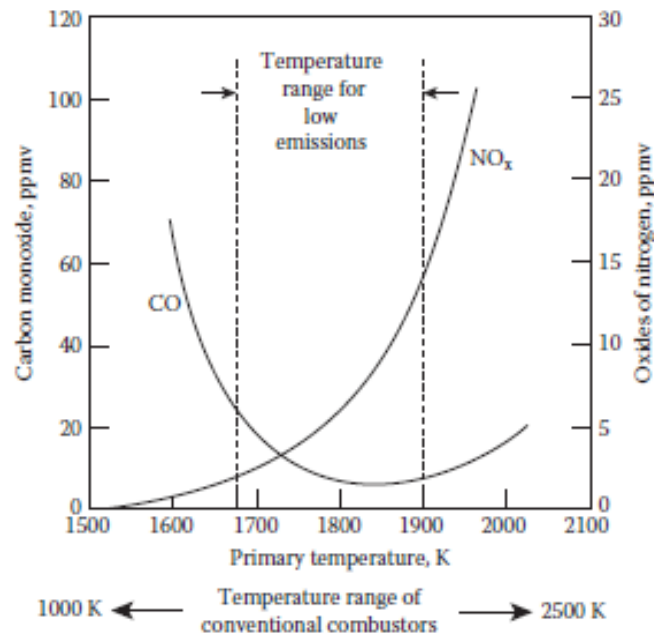


Slika 5.18. Utjecaj kvalitete raspršivanja na formiranje čestica čađi

2.2.3. Konstrukcijska rješenja

Smanjivanje emisije štetnih plinova u komorama izgaranja mlaznih motora bazira se na organizaciji procesa izgaranja tako da emisija štetnih plinova bude što manja, a ne na naknadnoj obradi ispušnih plinova (kao kod klipnih automobilskih motora!).

Na slici 5.19. se vidi da postoji kompromisno temperaturno područje izgaranja u kojem su emisije štetnih plinova najmanje.

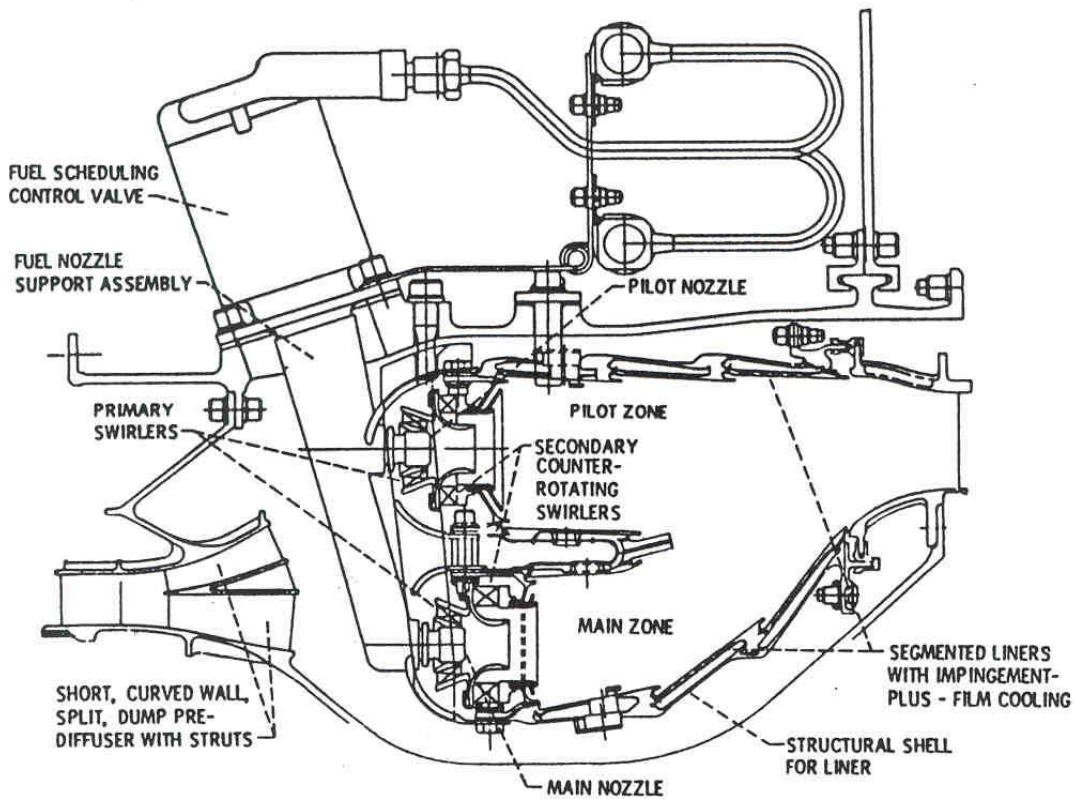


Slika 5.19. Utjecaj temperature u primarnoj zoni komore izgaranja

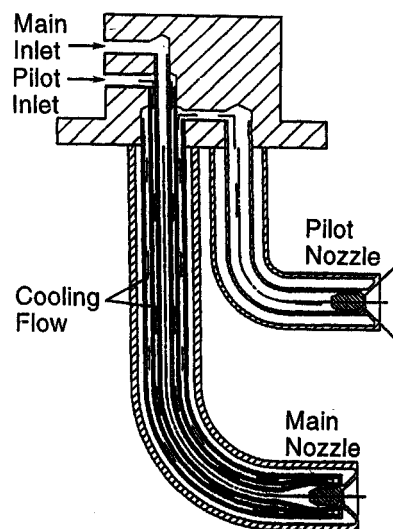
Jedno od rješenja je tzv. **fazno izgaranje**, ili tzv. fazne komore (*Staged Combustion, Staged Combustor*).

Takav način izgaranja može se provesti s tzv. radijalnim ili paralelnim faznim izgaranjem (*radial staging, parallel staging*), a takve komore zovemo dvostruke prstenaste komore (*dual-annular combustor*), a primjenjuje se kod motora tipa CFM56-5B, slika 5.20. Za vrijeme pokretanja i na malim opterećenjima (*idle*) izgaranje se obavlja u vanjskom prstenu (*pilot zone*), a na većim opterećenjima izgaranje se paralelno odvija i u glavnoj zoni (*main zone*).

Izgaranje u pilot zoni se odvija sa siromašnom smjesom od oko $\Phi=0,8$ kako bi se postigla niska koncentracija CO i UHC (slika 2.13). Kod većih opterećenja, ova zona služi kao inicijacija izgaranja za glavnu zonu koja se snabdjeva s potpuno izmješanom smjesom goriva i zraka (*fully premixed*) i u kojem je vrijeme reakcije kratka. Na najvećim potiskima, Φ u zonama izgaranja je 0,6 da se minimizira pojava NO_x.



Slika 5.20. Dvostruka prstenasta komora

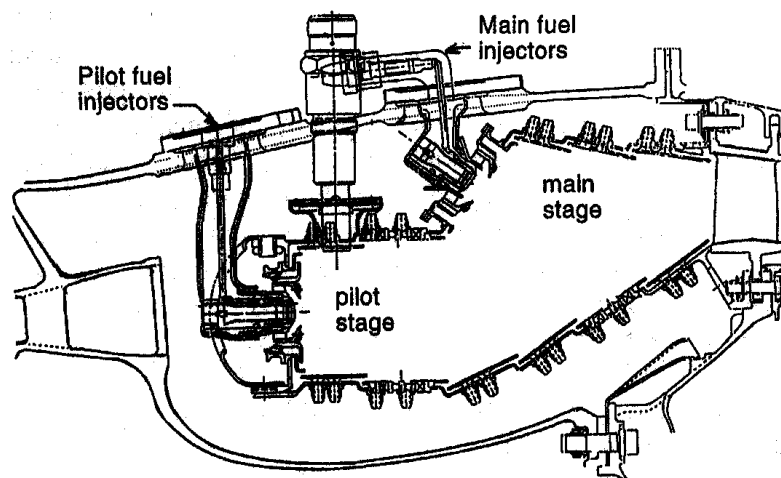


Slika 5.21. Brizgaljka za dvostruku prstenastu komoru izgaranja

Dobre osobine komore su što se dužina komore ne mora povećavati, što znači da se gotovo ne mora povećavati dužina vratila kompresor-turbina. Također, kod ovakvih komora, brizgaljke se mogu postaviti na jednom nosaču, što omogućava jednostavno hlađenje glavne brizgaljke za vrijeme dok ona ne ubrizgava gorivo. Važno je hladiti brizgaljku dok ona ne radi kako se gorivo nebi zapelo u njoj, slika 5.21.

Ovakav tip komore ima također i niz nedostataka. Obadvije zone dobivaju zrak direktno iz kompresora, to znači da imaju jednake temperature. To ima za posljedicu jednaku nisku sklonost ka gašenju plamena (*poor lean blowout limit*). Također se povećava i površina plamene cijevi (dupli prsten) pa je i veća potreba za hlađenjem, što ide na štetu efikasnosti. Zatim, izlazni profil temperature je pomaknut radijalno, a postoji i problem na srednjim opterećenjima kad jedna i druga komora rade izvan svojih optimalnih projektnih točaka.

Fazno izgaranje se može realizirati i u serijski ili aksijalno postavljenim komorama (*axial staged combustor*), npr. to je primjenjeno na Pratt and Whitney motoru V2500-AS, slika 5.22.

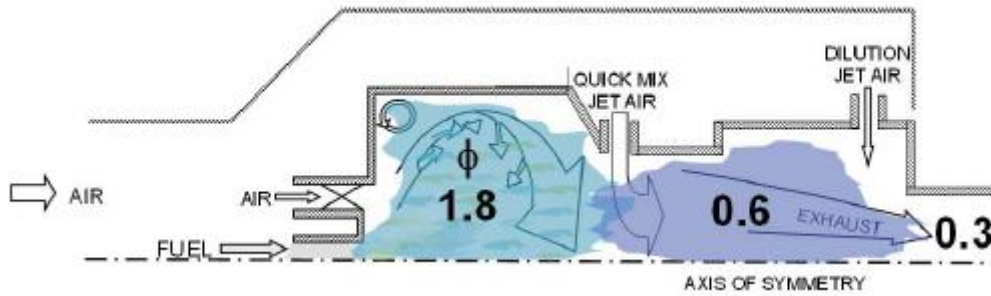


Slika 5.22. Aksijalno fazno izgaranje

Na malim opterećenjima izgaranje se obavlja u pilot zoni (*pilot stage*), a na većim opterećenjima, gorivo se ubrizgava u glavnu zonu serijski postavljenu iza *pilot zone*, što omogućava dobru pripremu smjese i rad sa siromašnom smjesom koja izgara sa malom koncentracijom NO_x i malom dimnošću. Također radijalni profil temperature izlaznih plinova iz komore je povoljan.

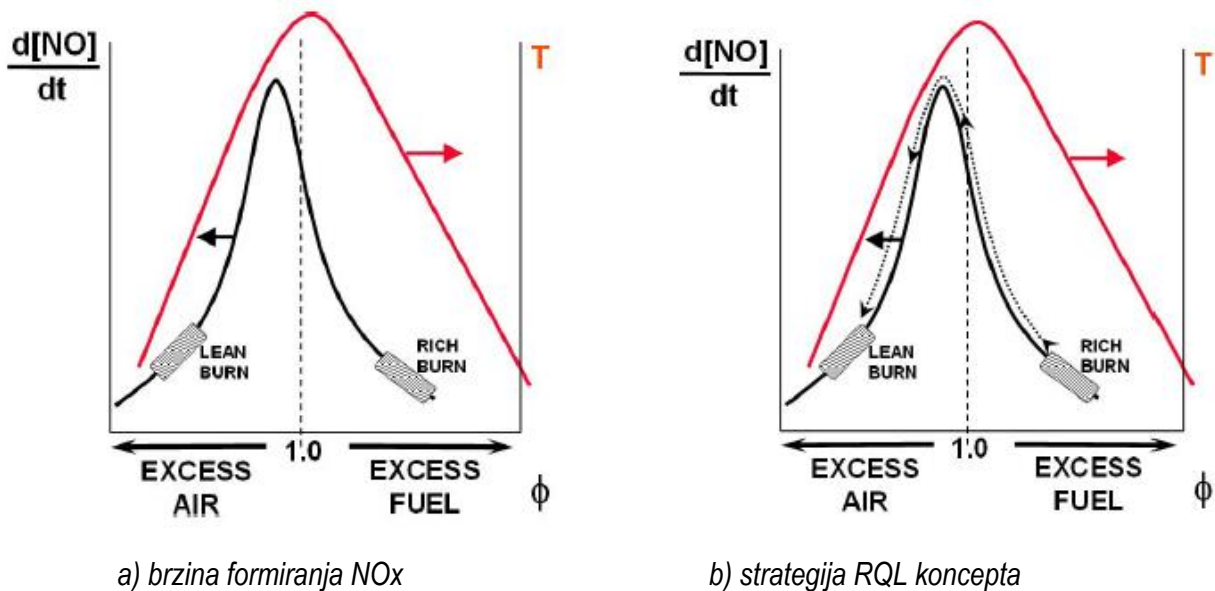
Glavni nedostatak ove komore je povećanje dužine (problem kod modifikacije motora!), potreba za dva nosača brizgaljki, te problem sa hlađenjem glavne brizgaljke.

U posljednje vrijeme radi se na razvoju tzv. RQL komora izgaranja (*Rich-Burn, Quick-Mix, Lean-Burn Combustor*). Navedeni koncept je postavljen 1980-tih godina kao moguća strategija za smanjenje NO_x za plinske turbine. Taj koncept je osnova u projektu TALON (*Technology for Advanced Low NO_x*) koja se primjenjuje u Pratt and Whitney tvrtci za zrakoplovne motore, slika 5.23.



Slika 5.23. Model RQL komore izgaranja

Izgaranje počinje u zoni vrlo bogate smjese (RICH BURN). Koncentracija NO_x je mala zbog nedostatka kisika i niske temperature. Brzo dovodjenje zraka (*Quick Jet Air*) prevodi proces naknadnog izgaranja u područje siromašne smjese (LEAN BURN) gdje je brzina stvaranja NO_x također mala. Time se izbjegava izgaranje u područjima stehiometrijske smjese, slika 5.24.



Slika 5.24. RQL koncept

Temperatura u zoni siromašne smjese ne smije biti previsoka da se nebi stvarao termički NO_x , ali mora biti dovoljno visoka za dogorijevanje UHC, CO i čađe.

6. TRGOVANJE EMISIJAMA (EUETS) I UČINKOVITO TROŠENJE GORIVA (FE)

Ovaj dio gradiva obrađuje programe zračnih prijevoznika koje se provode u cilju smanjenja emisija, odnosno, smanjenja potrošnje goriva.

(ovo poglavlje je u izradi, nadopunit će se početkom 2017/18).

LITERATURA

1. Tkal.ec, Biserka, Furač, Lidija: Plinski zakoni, Seminar 06, Fakultet kemiskog inženjstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2015. (dostupno na http://zoak.fkit.hr/nastava/pred_oiaak/Seminar%2006.-%20Plinski%20zakoni.pdf)
2. Sikirica, Milan: Stehiometrija, priručnik, Školska knjiga, Zagreb, 2014.
3. Bazijanac, Ernest: Zrakoplovni klipni motori, Fakultet prometnih znanosti, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2005.
4. Bazijanac, Ernest: Zrakoplovni mlazni motori, autoriziranja predavanja, Fakultet prometnih znanosti, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2014.
5. Lefebvre, A.H.: *Gas Turbine Combustion*, Taylor and Francis, New York, 1999.
6. Šagi, G., Tomić, R., Ilinčić, P.: *Razvoj propisa o dopuštenim emisijama štetnih tvari iz motora s unutarnjim izgaranjem*, Goriva i maziva, 48, 2:159-188, 2009.
7. Kalauz, Zoran: *EKO test*, Stručni bilten br. 87, Centar za vozila Hrvatske, Zagreb, 2000.
8. -, *Tehnika motornih vozila*, Hrvatska obrtnička komora, Pučko otvoreno učilište, Zagreb, 2004.
9. Golubić, J.: *Promet i okoliš*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb 1999.
10. Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change. "The Cancun Agreements: Outcome of the work of the Ad Hoc Working Group on Long-term Cooperative Action under the Convention," Decision 1/CP.16. 2010.
11. ICAO *Environment Report 2010: Aviation and Climate Change*. Quebec, Canada: Published under the authority of the Secretary General, 2010. p. 31.
12. Guidance for the Aviation Industry: *Monitoring and Reporting Annual Emissions and Tonne km Data for EU Emissions Trading*, 28 May 2009
13. Directive 2008/101/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008
14. Amending Directive 2003/87/EC so as to include aviation activities in the scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community, 13 January 2009, L 8/3.
15. Commission Decision of 16 April 2009 amending Decision 2007/589/EC as regards the inclusion of monitoring and reporting guidelines for emissions and tonne-kilometre data from aviation activities, 23 April 2009, L 103/10.
16. Commission Decision on the detailed interpretation of the aviation activities listed in Annex I to Directive 2003/87/EC.
17. Council Regulation (EEC) No 2407/92 of 23 July 1992 on licensing of air carriers as amended by Commission Regulation (EC) No. 859/2008 of 20 August 2008.
18. Convention on International Civil Aviation and its Annexes signed in Chicago on 7 December 1944.
19. J.A. Leggett, B. Elias, D. T. Shedd: Aviation and the European Union's Emission Trading Scheme, June 11, 2012
20. Verification Guidance for EU ETS Aviation: Verification of Annual Emissions Reports and Tonne-kilometre Reports for EU Emissions, TF-I/ITG/WP-/rev10/101130
21. Above top secrets <http://www.abovetopsecret.com/forum/thread878880/pg1> 2013.
22. <http://tes.jpl.nasa.gov/glossary/> - Radiative forcing 2013.

Dodaci:

1. Podloge za praktikum: Mjerenje i analiza ispušnih plinova zrakoplovnog klipnog motora
2. Primjeri ispitnih pitanja
3. Popis završnih i diplomskih radova iz područja emisija zrakoplovnih motora

Dodatak 1: Praktikum: Mjerenje i analiza ispušnih plinova zrakoplovnog klipnog motora

Datum i mjesto održavanja vježbi:	
Zrakoplov:	
Motor:	
Vrsta goriva:	
Naziv mjerne opreme:	BEA 150 / 250 / 350 Bosch Emission Analysis (opis u privitku)

Za vježbe je odabran zrakoplov PA -44, za kojeg je prilagođena mjerna oprema.

U realizaciji vježbi sudjeluje operater uređaja za mjerenje i operater zrakoplova (pilot ili tehničar)..

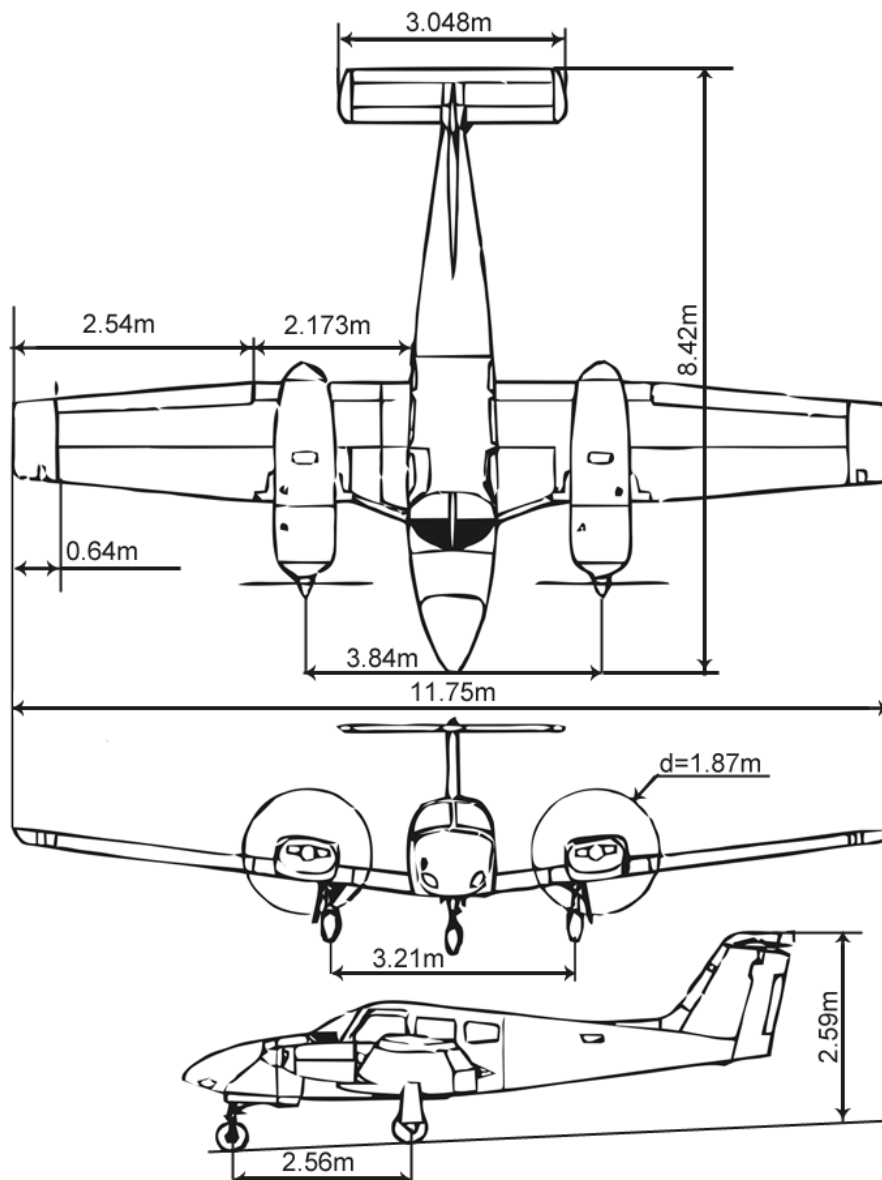
Teorijske osnove i praktično mjerenje izvršeno je i za potrebe završnog rada studneta Mateja Poljančića, koji završava preddiplomski studij Aeronautike, usmjerenje Civini pilot.

U nastavku je opisan zrakoplov i motor, te mjerna oprema i opis postupka mjerenja.

Na kraju se nalazi tablica koju studenti trebaju ispuniti s rezultatima mjerenja.

1. Opis i karakteristike zrakolova PA-44 Seminole

Piper PA-44 Seminole (slika 1.) je dvomotorni laki avion proizveden u Americi. Razvijen je na osnovi jednomotornog aviona Piper Cherokee i Arrow koji su jednomotorni zrakoplovi. Kako je u to doba na tržištu dominirao segment *high performance single* zrakoplova u početku se prvenstveno koristio za obuku pilota za let na višemotornom avionu.



Slika 1 Izgled i veličina zrakoplova PA 44

Seminole je izrađivana od 1979. godine i, s nekoliko prekida u proizvodnji, proizvodi se do danas, a osnovna cijena modela prelazi iznos od pola milijuna američkih dolara. Prvi izrađeni PA-44 bili su opremljeni s dva motora Lycoming O-360 od 180 HP. Pri tom je eliminiran slučaj kritičnog motora jer je desni motor suprotnog okretanja od lijevog motora. Gledano iz kabine zrakoplova lijevi motor se okreće u smjeru kazaljke na satu.¹¹

Tehničko – eksploatacijske karakteristike PA-44:¹²

Lijevi motor:	Lycoming O-360-A1H6
Desni motor:	Lycoming LO-360-A1H6
Snaga motora:	180 HP (135 kW) pri 2700 rpm (o/min)
Posada:	1 pilot
Kapacitet:	3 putnika
Dužina:	8,41 m
Raspon krila:	11,77 m
Površina krila:	17,1 m ²
Visina:	2,59 m
Masa zrakoplova:	2360 lb
Maksimalna masa uzlijetanja:	3800 lb
Najveća brzina:	202 kt
Ekonomska brzina (75%):	155kt
Dolet:	1000NM (1.630 km)
Brzina penjanja:	1,200 ft/min (366 m/min)
Najveća visina leta:	5.213 m

¹¹ Piper Seminole PA – 44 – 180 Information manual / Publications department, Piper aircraft corporation, 1978.

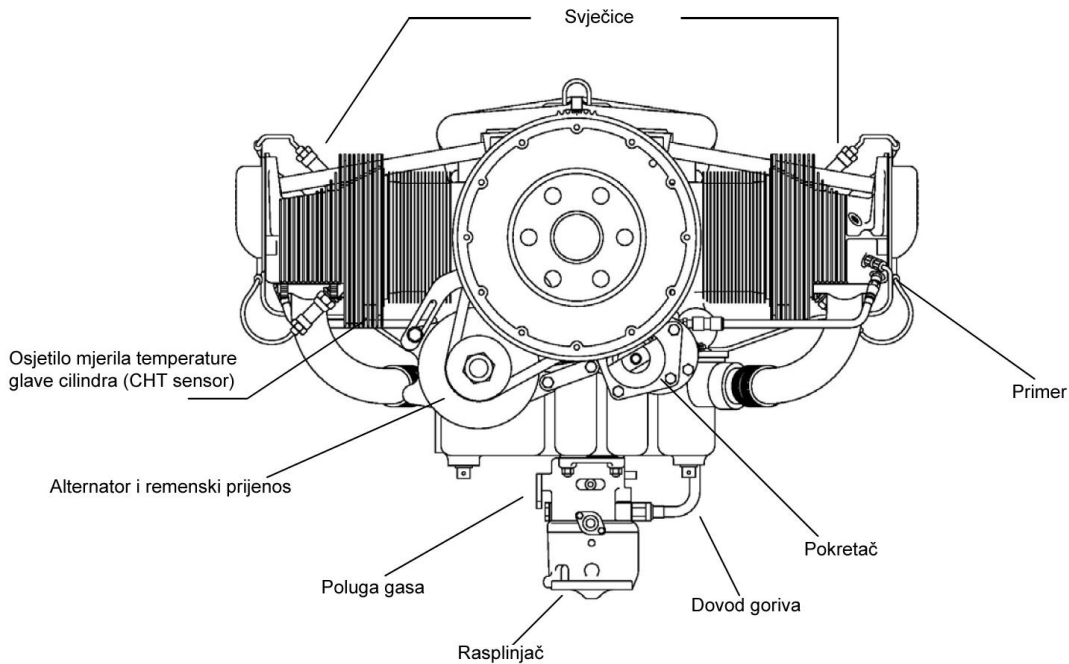
¹² Piper Seminole PA – 44 – 180 Information manual / Publications department, Piper aircraft corporation, 1978.

Omjer potisak/težina: 10.55 lb/hp (0.16 kW/kg)

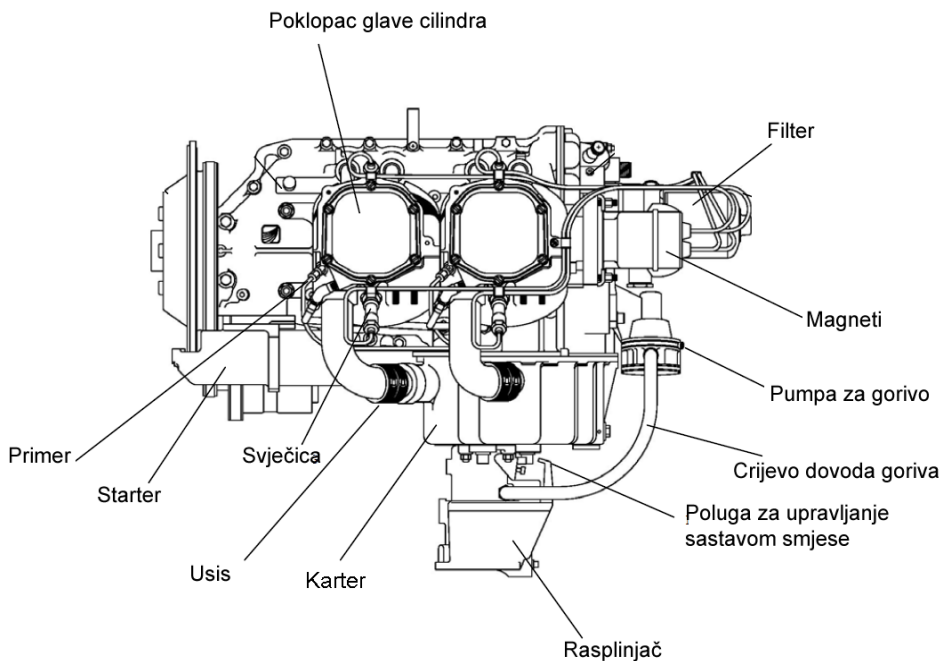
Specifično opterećenje krila: 21.1 lb/ft² (100.8 kg/m²)

2. Lycoming motor serije O-360

Motori serije O-360 su četverotaktni Ottovi motori bez prednabijanja, hlađeni zrakom, koji se napajaju gorivom pomoću rasplinjača (slike 2 . i 3.)



Slika 2 - Nacrt motora



Slika 3 - Bokocrt motora

Motor oznake **O-360-H2AD**:

O – boksterski motor

360 – radna zapremnina izražena u in³

H2AD* – ime modela motora

- * H - tip elise (dvokraka teretna elisa)
- 2 - vrsta nosača motora (rešetkasti nosač s gumenim amortizerima tipa 2)
- A - precizni rasplinjač
- D - oznaka duplih magneta u istom kućištu

Maksimalna deklarirana snaga motora je – 160 HP pri 2700 rpm

Motor oznake **(L)O-360-A1H6**:

L – okretanje vratila u suprotnu stranu od originalnog modela na kojem je temeljen

O – boksterski motor

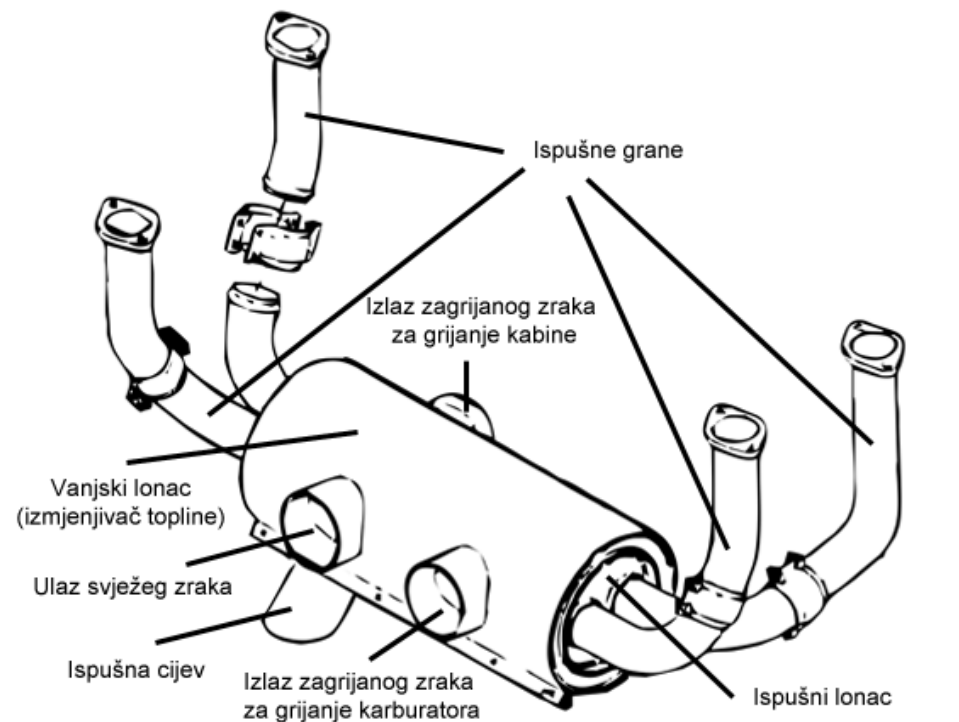
360 – radna zapremnina izražena u in³

A1H6* - oznaka modela

- * A - tip elise (dvokraki *Hartzell* propeler stalne brzine)
- 1 - tip nosača motora (rešetkasti nosač s gumenim amortizerima)
- H - precizni rasplinjač
- 6 - tip rasplinjača (grijan uljem i zrakom)

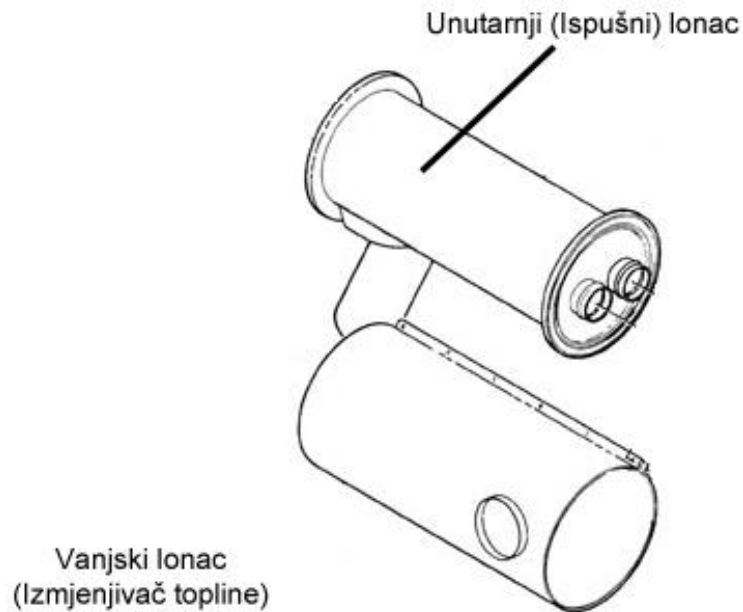
Cilindri su klasične konstrukcije za zrakom hlađene motore, a sastoje se od glave cilindra i samog cilindra. Glava cilindra izrađena je od legure aluminija i sadrži kućišta ventila i komoru za izgaranje. Upravljanje ventilima odvija se preko bregastog vratila postavljenog paralelno s koljenastim vratilom, koje upravlja hidrauličkim podizačima ventila, koji preko poluga otvaraju i zatvaraju ventile. Donji dio kućišta motora izrađen je od aluminija, iz dva dijela spojena vijcima, između kojih se ne stavlja brtva, jer su spojevi precizno obrađeni. Koljenasto vratilo izrađeno je od krom-nikl-molibden legure čelika, koje je nitrirano na mjestima kliznih ležajeva. Klipnjača je izrađena od ojačanog, termički obrađenog čelika. Klipovi su izađeni od legure aluminija, ovisno o inačici motora mogu imati tri ili četiri prstena za klipne prstenove, koji mogu biti polovični ili potpuno opasavajući, ovisno o inačici motora. Sustav hlađenja izveden je dodavanjem rebara na tijelo cilindra, a motor se hladi preusmjeravanjem dijela zraka unutar kućišta motora. Zrak za hlađenje ulazi kroz usmjerivače, prelazi preko vanjske strane cilindra i izlazi na stražnjoj strani kućišta. Ovi motori opremljeni su rasplinjačem s plovkom, te se spravljanje smjese vrši na jednom mjestu za sve cilindre (jedan rasplinjač), a kompletni sustav s

isparivačem goriva uronjen je u ulje, što poboljšava isparavanje goriva, ali i pripomaže hlađenju ulja. Smjesa zraka i goriva od rasplinjača dovodi se u svaki cilindar posebnom cijevi. Svi O-360 motori imaju *primer* sustav ubrizgavanja goriva u usini vod radi lakšeg pokretanja motora kada je motor hladan. To se ne odnosi na IO-360 seriju i sve ostale motore s direktnim ubrizgavanjem. Sustav zapaljenja smjese sastoji se od dvostrukih magneta i svjećica. Sustav za odvođenje ispušnih plinova sastoji se od četiri ispušne grane, spojene na jedan ispušni lonac, koji ima jednu ispušnu cijev promjera cca 5cm. Važno je napomenuti da je ispušni sustav na motorima serije O-360 vrlo kratak pa se ispušni plinovi ne stignu ohladiti te se na izlazu iz ispušne cijevi dostižu visoke temperature. Izgled ispušnog sustava C-127 prikazan je odvojeno od motora na slikama 4. i 5.¹³



Slika 4 - Prikaz ispušnog sustava za odvođenje smjese ispušnih plinova C-172

¹³ AVCO Lycoming - O-360 and associated models AIRCRAFT ENGINES / AVCO Lycoming division, Williamsport, pennsylvania, 1976.



Slika 5. - Prikaz rastavljenog sustava za odvođenje smjese ispušnih plinova C-172

3. Karakteristični režimi rada zrakoplovnog klipnog motora

Mjerenje ispušnih plinova obaviti će se za nekoliko režima rada motora, gdje će se na zemlji simulirati režimi rada motora u svakodnevnim operacijama-

Ti režimi objavljeni su od strane proizvođača motora u priručniku za korištenje motora. **Maksimalna snaga polijetanja** (*Takeoff power*) je najveća dopuštena snaga zrakoplova, koju je dozvoljeno koristiti najduže do pet minuta, pa se naziva i petominutnom snagom. Koristi se prilikom polijetanja ili *go-around* procedura. Jedan od karakterističnih režima rada je i MCP –**maksimalna trajna snaga** (*eng. Maximum continuous power*), to jest snaga kojom motor može raditi dulji period, a da ne dođe do pregrijavanja motora. Nekim motorima deklarirana trajna snaga jednaka je snazi polijetanja. Osim navedenih režima rada, proizvođači u priručnicima za korištenje motora moraju objaviti i režime rada u krstarenju, i to dva klasična režima – **najveća snaga krstarenja** (*eng. Maximum cruise power*), i **ekonomična snaga krstarenja** (*eng. Economy cruise power*).

4. Opis postupka mjerenja i mjerne opreme za mjerenje sastava ispušnih plinova zrakoplovnog klipnog motora

4.1. Osnovno o parametrima mjerenja

Pri ispitivanju sastava ispušnog plina Otto motora analizatorima mjeri se volumenski udio sljedećih tvari:

ugljični dioksid CO₂
ugljični monoksid CO
ugljikovodici HC
kisik O₂
dušikovi oksidi NO_x

Mjerenje volumenskog udjela pet nabrojanih plinova u ukupnom volumenu ispušnog plina, mjerenje nekih parametara rada motora (temperature ulja i brzine vrtnje motora) te proračun pojedinih značajki izgaranja (proračun λ faktora) dovoljni su za procjenu optimalnosti izgaranja. Volumenski udio plinova bitnih za ovo mjerenje ovisi o smjesi gorivo–zrak te se može prikazati u ovisnosti o faktoru zraka, λ. Faktor zraka izračunava se pomoću empirijske Brettschneider-ove formule¹⁴:

$$\lambda = \frac{[\text{CO}_2] + \frac{[\text{CO}]}{2} + [\text{O}_2] + \left| \frac{\text{H}_{\text{cv}}}{4} \times \frac{3,5}{3,5 + \frac{[\text{CO}]}{\text{CO}_2}} - \frac{[\text{O}_{\text{cv}}]}{2} \right| \times ([\text{CO}_2] + [\text{CO}])}{\left(1 + \frac{\text{H}_{\text{cv}}}{4} - \frac{\text{O}_{\text{cv}}}{2} \right) \times ([\text{CO}_2] + [\text{CO}] + K_1 \times [\text{HC}])}$$

gdje su:

CO₂, CO, O₂ i HC – koncentracije komponenti ispušnog plina izražene u postocima,

K₁ – konverzijski faktor za HC, zbog metode mjerenja, NDIR (Non-Dispersive Infrared) koja se ovdje koristi. Prema FID (Flame Ionization Detector), vrijednost ovog faktora je 8,

HCV – odnos vodika i ugljika u gorivu, tipična vrijednost ovog faktora je 1,7261,

OCV – odnos vodika i kisika u gorivu, tipična vrijednost ovog faktora je 0,0175.

Uz ove faktore rezultat je λ=1 za idealni (stehiometrijski) omjer smjese gorivo–zrak. Za bogatu smjesu je λ<1, a za siromašnu smjesu je λ>1.

4.2. Princip rada analizatora ispušnih plinova

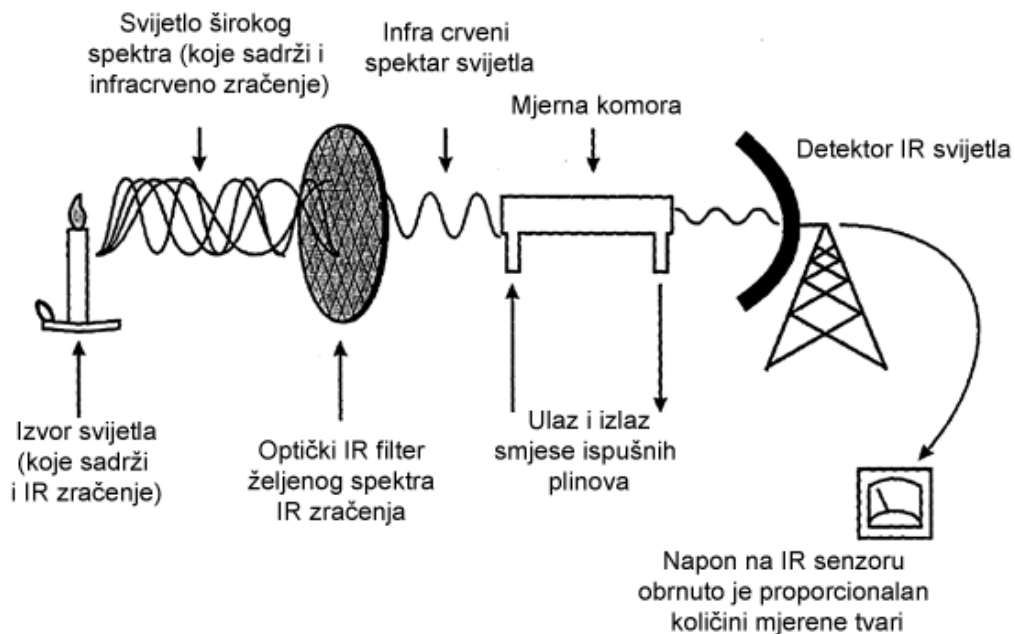
Kisik se mjeri elektrokemijskom mjernim pretvornikom, posebnom gorivom ćelijom, kojoj je napon na izlazu proporcionalan koncentraciji kisika. Za mjerenje kisika, uređaj se prije svakog mjerenja automatski

¹⁴ 62xx Product Manual, 6230 & 6231 Automobile Analyzers / Andros Europe GmbH, Südstrasse 1, D – 77767 Appenweier-Urloffen, Njemačka, 1995.

ugađa mjereći zrak u kojem je volumenski udio kisika približno 20,9 %. Precizno mjerenje kisika je presudno za izračunavanje λ faktora.

Dušikovi oksidi, NO_x, se rijetko mjere, i ne sudjeluju u izračunu λ faktora, a koncentracija ovisi prvenstveno o samoj konstrukciji motora, odnosno o maksimalnoj temperaturi i tlaku u procesu izgaranja goriva.

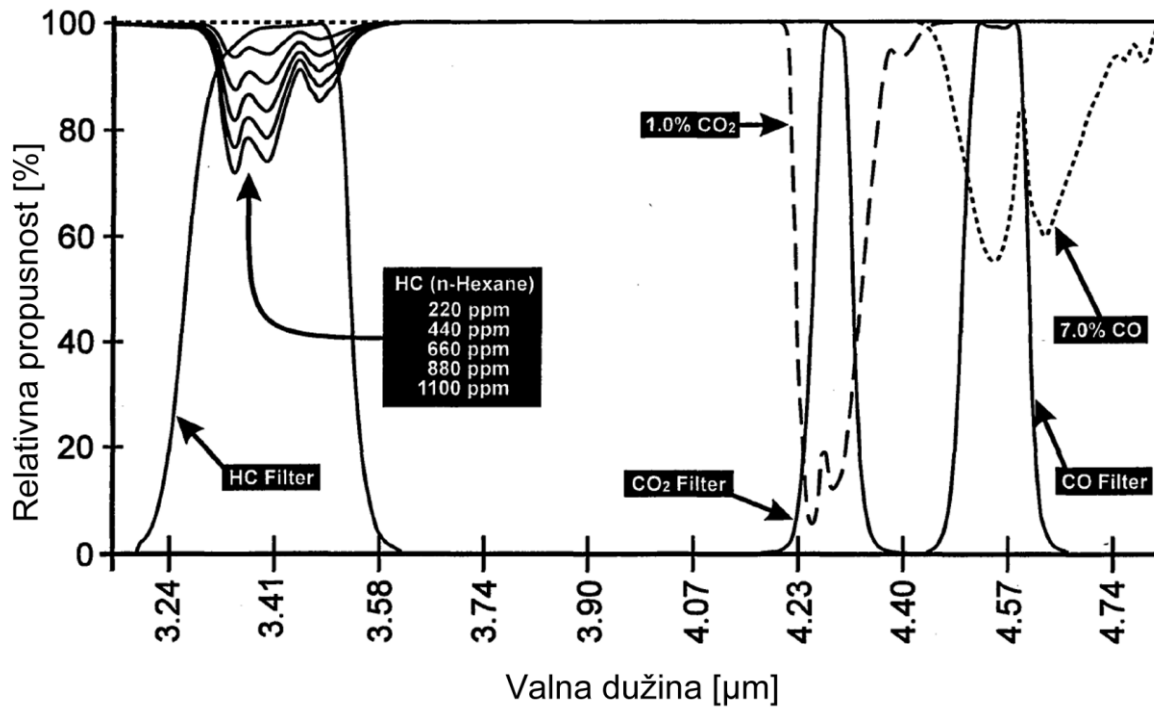
CO₂, CO i kompleks ugljikovodika HC mjere se tzv. NDIR (*Non-Dispersive Infrared*) metodom, a to je spektroskopska metoda u infracrvenom dijelu spektra, u području valnih dužina od 3 μ m do 5 μ m. Navedeni plinovi imaju svojstvo da apsorbiraju infracrveno zračenje na određenom dijelu spektra, Na slici 6. je načelna shema mjerenja¹⁵:



Slika 6. Princip NDIR metode mjerenja

Izvor infracrvenog zračenja (*Infrared Light Source*), tamno crveno užaren grijač, emitira zračenje u širokom spektru (*Wideband Light Beam Containing Infrared*), koje se preko uskočasnog optičkog filtra (*IR Optical Bandpass Filter*) svede na spektar karakterističan za plin koji se mjeri (*Specific Wavelength Of Infrared Light*). Infracrveno svjetlo „određene boje“ prolazi preko mjerne komore (*Gas Sample Cell*). U mjernoj komori je prije mjerenja zrak. Pomoću fotoćelije osjetljive na infracrvene zrake (*Infrared Detector*) izmjeri se referentna vrijednost infracrvenog zračenja. Sada se u mjernu komoru uvede mješavina plina, a na instrumentu (*Infrared Detector Output Inversely Proportional To Gas Concentration*) dobije se vrijednost koncentracije mjenog plina koja je proporcionalna apsorpciji na dotičnom dijelu spektra infracrvenog svjetla.

¹⁵ 62xx Product Manual, 6230 & 6231 Automobile Analyzers / Andros Europe GmbH, Südstrasse 1, D – 77767 Appenweier-Urloffen, Njemačka, 1995.



Slika 7. Dijagram ovisnosti relativne propusnosti uzorka o valnoj duljini¹⁶

Na dijagramu na slici 7. dana je spektralna karakteristika relativne propusnosti izražene u postotcima za HC, CO₂ i CO, te za pripadajuće filtre na spektru valnih dužina izraženih u μm (cca. 3 μm – 5 μm.) HC je, inače u ispušnom plinu, kompleks ugljikovodika, a načešće se izražava preko ekvivalentne vrijednosti koncentracije heksana (*n-Hexane*).

4.3. Tehničke karakteristike korištenog analizatora ispušnih plinova

Prilikom mjerenja korišten je analizator ispušnih plinova marke BOSCH, tipa BEA350 (slika 8.) Navedeni analizator je prvenstveno namijenjen za mjerenja na automobilima, stoga i zbog sigurnosti nije mjerena temperatura i broj okretaja motora, nego su za to korišteni instrumenti u avionu. Korišteni instrumenti zrakoplova su indikator temperature ispušnih plinova - *Exhaust gas temperature indicator* (EGT); indikator tlaka punjenja - *Manifold absolute pressure indicator* (MAP) i instrument za mjerenje broja okretaja – *RPM indicator* (RPM). Instrumenti su vidljivi na instrumentalnoj ploči zrakoplova, slika 10.

¹⁶ 62xx Product Manual, 6230 & 6231 Automobile Analyzers / Andros Europe GmbH, Südstrasse 1, D – 77767 Appenweier-Urloffen, Njemačka, 1995.

Mjerne karakteristike analizatora prikazane su u Tablici 1.¹⁷:

Tablica 1. - Mjerene veličine, mjerni opsezi i razlučivost uređaja

Mjerena veličina	Mjerni opseg	Rezolucija
CO	0.000 ... 10.00 %	0.001%
CO ₂	0.00 ... 18.00 %	0.01%
HC	0 ... 9999 ppm	1 ppm
O ₂	0.00 ... 22.00 %	0.01%
Lambda	0.500 ... 9.999	0.001
Broj okretaja	0 ... 15000	10
Temperatura	-20 ... +150 °C	0.16 °C

NAPOMENA: Na ispisu rezultata mjerenja vide se još parametre CO_{cor} i PEF.

CO_{cor} je korigirana vrijednost volumenskog udjela CO, a računa se po formuli:

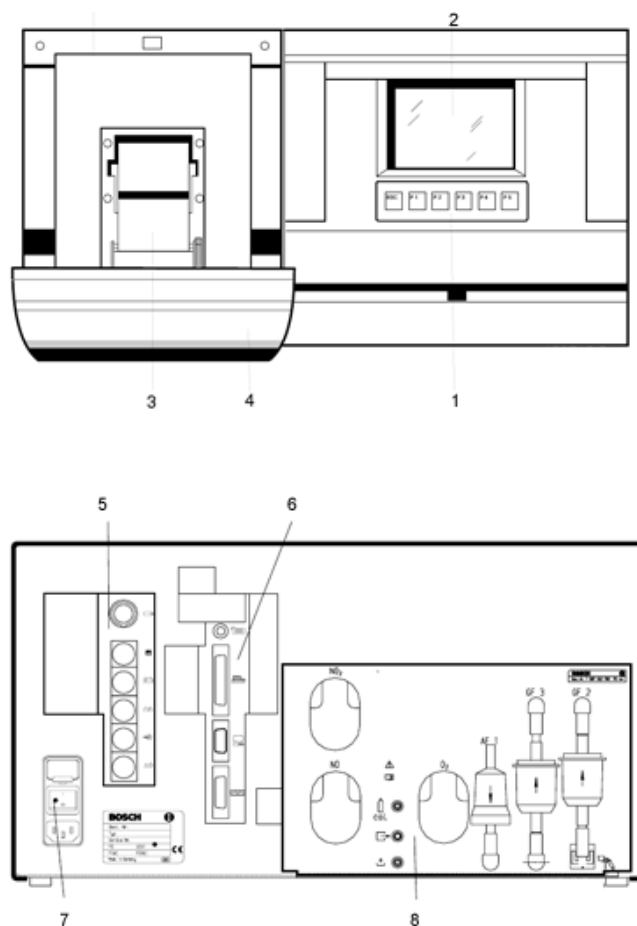
$$CO_{cor} = K \cdot CO / (CO + CO_2),$$

gdje je K=15 za benzin, K=12 za metan i K=14 za UNP (propan-butan) za [(CO + CO₂) < K], inače je CO_{cor} = CO.

Korigirana vrijednost volumenskog udjela, CO_{cor}, je korisna za procjenu stvarnog udjela CO u ispušnom plinu u slučaju kada postoji mješavina ispušnog plina i zraka.

PEF je tzv. „propan-heksan faktor“. Volumenski udio HC je izražen preko ekvivalentne vrijednosti heksana, HC podijeljen s PEF daje ekvivalentnu vrijednost propana.

¹⁷ BEA 150 / 250 / 350 Bosch Emission Analysis Equipment description / Robert Bosch GmbH, Njemačka



Slika 8. Izgled uređaja Bosch BEA 350

- 1 – upravljačka tipkovnica uređaja; 2 – ekran; 3 – izlaz pisača;*
- 4 – poklopac pisača; 5 – konektori za rpm senzor i senzor temperature;*
- 6 – konektori za komunikaciju; 7 – smještaj napajanja i prekidač uređaja;*
- 8 – modul uređaja za analizu ispušnih plinova koji se sastoji od NDIR senzora, senzora kisika, filtera čestica, konektora za mjernu sondu uređaja*



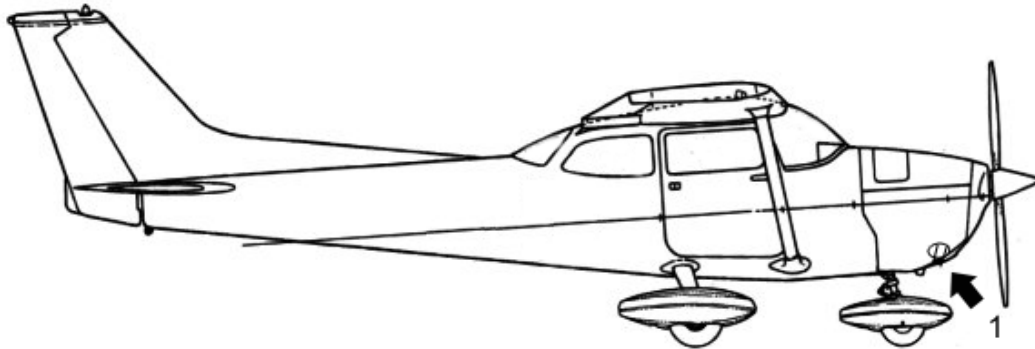
Slika 9. - Uređaj za analizu ispušnih plinove otto motora Bosch Bea-350



Slika 10. Cockpit zrakoplova PA-44, motorski instrumenti i poluge za upravljanje motorom

4.4. Opis postupka mjerenja sastava ispušnih plinova zrakoplovnog klipnog motora

Prilikom mjerenja zrakoplovu se mora pristupati oprezno zbog rotirajuće elise zrakoplova i zbog zagrijanih dijelova ispuha, zbog sitnih čestica usisanih s elisom, ali i zbog znatne količine ugljičnog monoksida iz ispuha. Potrebna je zaštita od buke, ali i protupožarna oprema u neposrednoj blizini zrakoplova. Mjerenja izvode minimalno dvije osobe, između kojih je potrebna stalna komunikacija.



Slika 5.5. Smještaj ispušne cijevi na zrakoplovu C-172

Svako mjerenje traje između trideset sekundi i jedne minute. Mjerenje se izvodi tako da se sonda postavi na izlazu iz ispušne cijevi, a zatim se motor zagrije na radnu temperaturu, što se provjerava na indikatoru temperature ulja zrakoplova, kako bi mjerenja bila što vjerodostojnija simuliranim uvjetima. Nakon toga vrši se mjerenje.

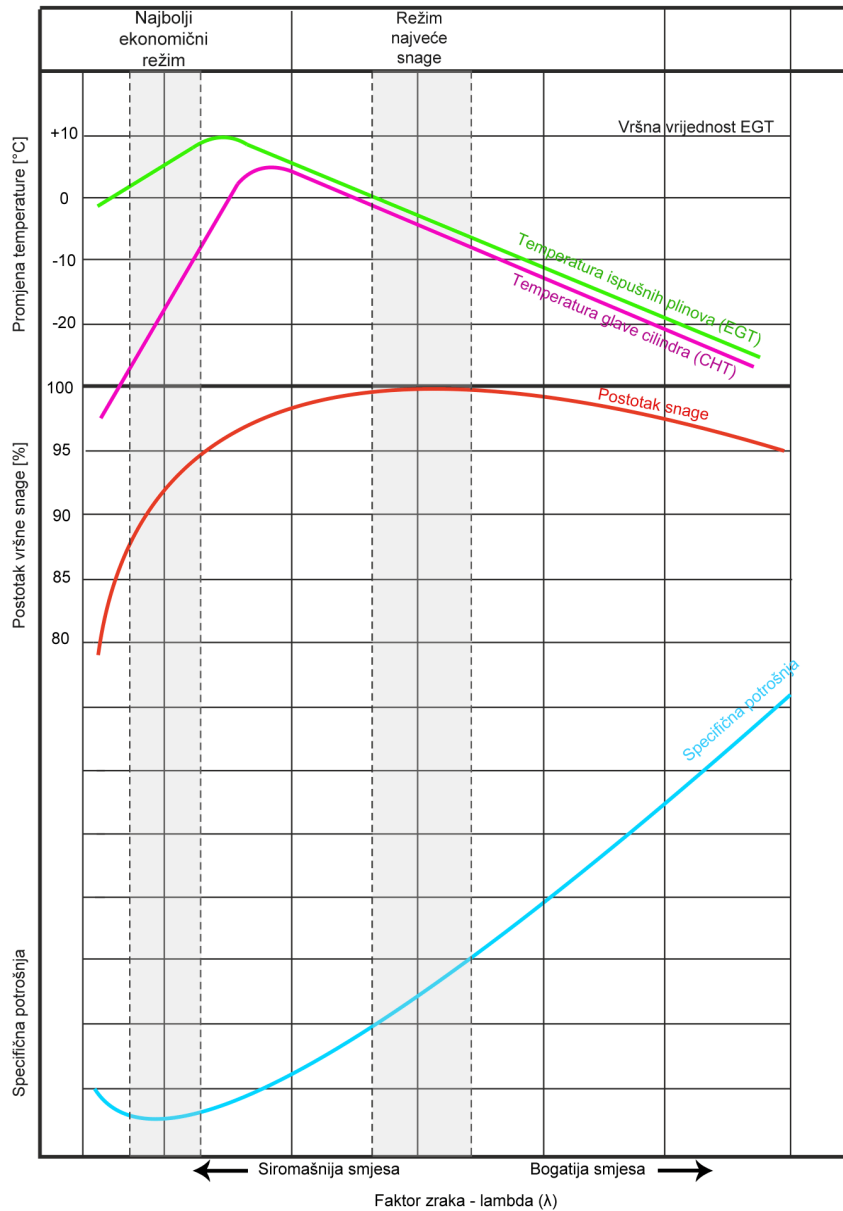
Prikaz smještaja ispušne cijevi zrakoplova C172 prikazan je na slici 5.5..

Postupak mjerenja:

1. Osoba u zrakoplovu postavlja motor u željeni režim rada.
2. Motor se održava u željenom režimu sve dok se rezultati mjerenja ustabile, što se prati na ekranu uređaja za analizu ispušnih plinova i na instrumentima zrakoplova. Iako uređaj prikazuje rezultate u stvarnom vremenu, ima kašnjenje od nekoliko sekundi vremena zbog dužine cijevi za uzimanje uzorka.
3. Na uređaju za analizu ispušnih plinova, osoba izvan zrakoplova odabere opciju ispisa izmjerenih podataka, ili spremanja podataka u memoriju uređaja za kasniji ispis.
4. Osoba unutar zrakoplova očitava i upisuje ručno u tablicu MAP i RPM.

5. Mjerenje se ponavlja za svaki režim rada koji će se promatrati.

Za postavljanje zrakoplova u željeni režim rada koriste se indikator temperature ispušnih plinova, RPM indikator i MAP indikator, a postupak osiromašivanja smjese izvodi se po dijagramu 5.

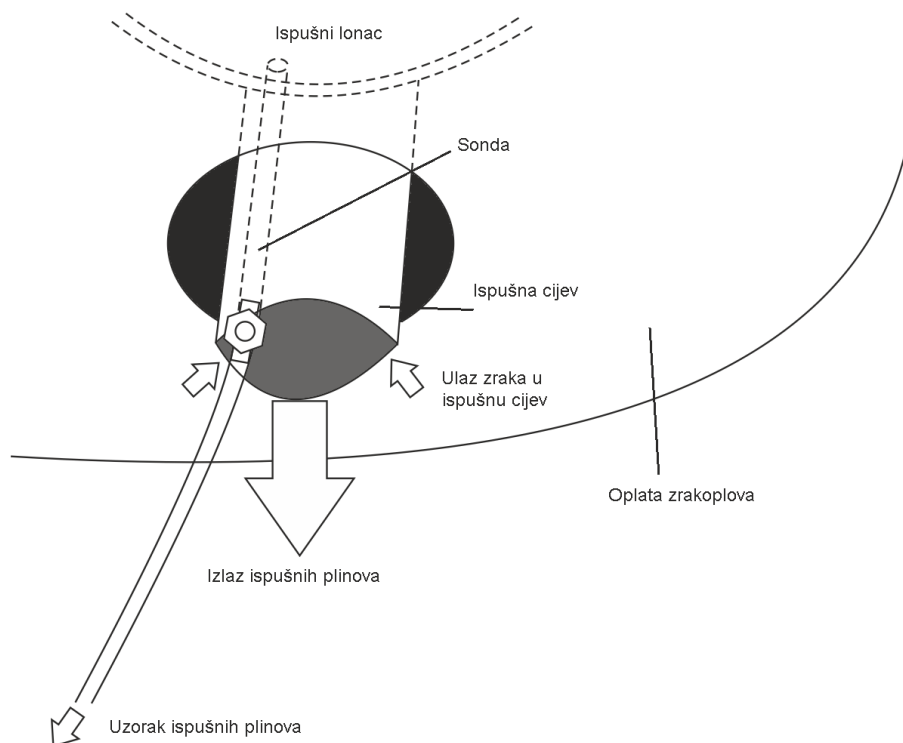


Dijagram 5. - Prikaz promjene temperature glave cilindra i promjene temperature ispušnih plinova ovisno o bogatstvu smjese

4. Analiza rezultata mjerenja te usporedba postupka mjerenja i rezultata mjerenja za zrakoplovni i automobliski otto motor

4.1. Analiza prvog mjerenja na zrakoplovu C-172 (za potrebe praktikuma iz predmeta Zrakoplovne emisije ak.god.2010/11)

Za potrebe prvog mjerenja korištena je standardna sonda koja se koristi za ispitivanje automobilskih motora. Kako je konstrukcija ispušnog sustava C172 vrlo kompaktna, jako je kratka udaljenost koju ispušni plinovi prelaze od same radne komore motora do ispušne cijevi, tako da su i temperature na izlazu iz cijevi puno veće što je rezultiralo uništavanjem sonde. Prilikom prvog mjerenja uočeni su i ostali problemi zbog kojih je bilo nužno prilagoditi mjernu opremu za mjerenje ispušnih plinova na avionskom motoru (slika 11).



Slika 11 - Princip prvog mjerenja na zrakoplovu C-172

Uočeni nedostaci prvog mjerenja su:

1. zbog kratkog ispušnog sustava na zrakoplovnom motoru temperatura ispušnih plinova na izlazu iz ispušne cijevi je previsoka. Originalna usisna sonda za uzimanje uzorka plina ima silikonske ili teflonske dijelove koji ne podnose tako visoke temperature
2. zbog kratke ispušne cijevi i relativno velikog promjera rezultati mjerenja su ukazivali da, zbog dinamičkog podtlaka, dolazi do značajnog miješanja zraka iz okoline i ispušnog plina. U uvjetima kada je postotak kisika očekivano trebao biti barem ispod 1% mjereno je i do 5% kisika, dakle mjerena je mješavina ispušnog plina i skoro četvrtina zraka. Ovo miješanje je također bilo vidljivo i po smanjenim vrijednostima ostalih sastavnica ispušnog plina.

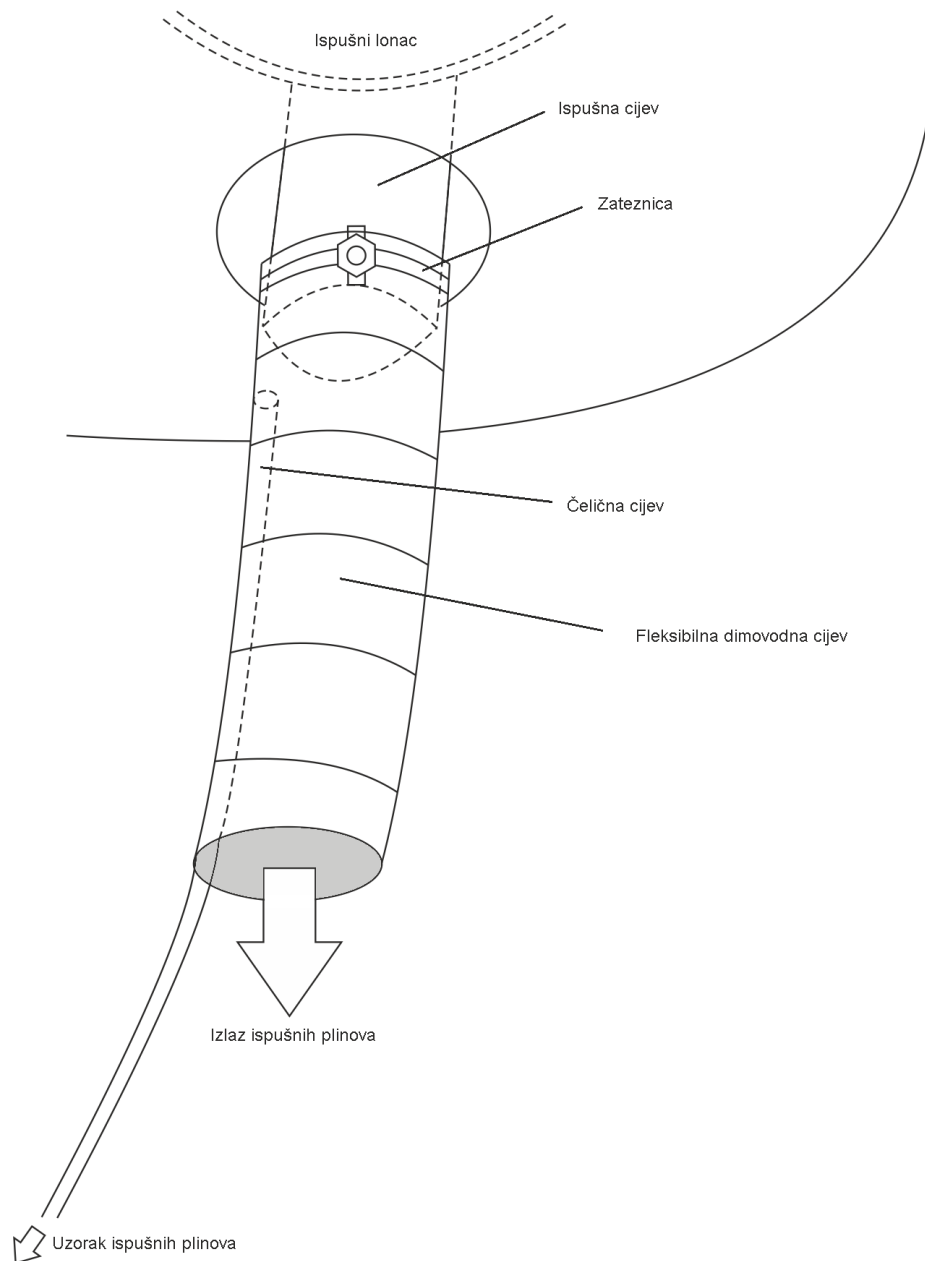
Na slici 11. prikazan je princip prvog mjerenja. S obzirom da je ispušna cijev dugačka otprilike kao i sama sonda, sonda je bila unutar ispušnog lonca, te je bila izložena vrlo visokim temperaturama. Nakon analize rezultata prvog mjerenja bilo je očito da je mjerenje neprecizno stoga se moralo modificirati sondu za mjerenje, tako da sama sonda podnosi visoke temperature, ali i da se snizi temperatura ispušnih plinova prije ulaska u sam uređaj zbog potencijalne opasnosti od oštećenja mjerne opreme. Rješenje navedenih problema je prikazano na slici 12.

4.2. Izrada sonde za ispitivanje sastava ispuših plinova

Kako sama modifikacija sonde za mjerenje nije bila dovoljna jer problematika mjerenja nije dozvoljavala jednostavnu prilagodbu sonde, trebalo je pristupiti izradi nove sonde koja će uspješno uzimati uzorke ispušnih plinova zrakoplova. Pritom su uzeti u obzir sljedeći uvjeti:

1. sonda podnosi izlaganje visokim temperaturama tokom dužeg perioda
2. uzorak ispušnih plinova stigne se ohladiti do ulaska u uređaj
3. sonda nikako ne utječe na rad motora
4. sonda ne utječe negativno na rezultate mjerenja

Najjednostavnije rješenje bilo je produženje same ispušne cijevi s drugom cijevi većeg promjera, te zbog velikog promjera cijevi, dovoljno duboko postaviti drugu cijev u koju će ulaziti uzorak ispušnih plinova, koja će služiti kao usisna sonda (slika 12.). Kao usisna sonda upotrebljena je čelična bešavna cijev, koja se inače koristi za hidraulične instalacije, promjera 6 mm i duljine cca 3 m. Čelična cijev je upotrebljena jer sigurno podnosi danu temperaturu, a razlog zašto je cijev tako dugačka je zbog toga da se ispušni plin ohladi do prijelaza na plastičnu cijev kojom se dalje vodi do analizatora.



Slika 12. Princip mjerenja s novom sondom

Kao produžetak ispušne cijevi upotrijebljena je fleksibilna čelična dimovodna cijev promjera cca 50 mm dužine cca 80 cm, tako da se uzorak plina može uzeti dovoljno duboko od izlaza u području u kojem se s ispušnim plinovima sigurno ne miješa vanjski zrak.

Za potrebe praktikuma, mjerenje će se izvršiti za 6 različitim režima rada motora, i to:
(ne nužno ovim redoslijedom)

- 1. Idle – mixture full rich**
- 2. Idle – mixture lean**
- 3. Maximum continuous power - mixture full rich**
- 4. Maximum continuous power - mixture lean**
- 5. Economy cruise 60% – mixture full rich**
- 6. Economy cruise 60% – mixture lean**

U nastavku su tablice za upis podataka, po redoslijedu mjerenja:

1. MJERENJE:			
Komentar:	Mjerena veličina	Mjerna jedinica	Rezultat
	Lambda (λ)	N/A	
	CO	% vol.	
	CO ₂	% vol.	
	HC	ppm vol	
	O ₂	% vol.	
	COcor	% vol.	
	PEF	N/A	
	RPM	1/min	
	MAP	In Hg	

2. MJERENJE:			
Komentar:	Mjerena veličina	Mjerna jedinica	Rezultat
	Lambda (λ)	N/A	
	CO	% vol.	
	CO ₂	% vol.	
	HC	ppm vol	
	O ₂	% vol.	
	COcor	% vol.	
	PEF	N/A	
	RPM	1/min	
	MAP	In Hg	

3. MJERENJE:			
Komentar:	Mjerena veličina	Mjerna jedinica	Rezultat
	Lambda (λ)	N/A	
	CO	% vol.	
	CO ₂	% vol.	
	HC	ppm vol	
	O ₂	% vol.	
	COcor	% vol.	
	PEF	N/A	
	RPM	1/min	
	MAP	In Hg	

4. MJERENJE:			
Komentar:	Mjerena veličina	Mjerna jedinica	Rezultat
	Lambda (λ)	N/A	
	CO	% vol.	
	CO ₂	% vol.	
	HC	ppm vol	
	O ₂	% vol.	
	COcor	% vol.	
	PEF	N/A	
	RPM	1/min	
	MAP	In Hg	

5. MJERENJE:			
Komentar:	Mjerena veličina	Mjerna jedinica	Rezultat
	Lambda (λ)	N/A	
	CO	% vol.	
	CO ₂	% vol.	
	HC	ppm vol	
	O ₂	% vol.	
	COcor	% vol.	
	PEF	N/A	
	RPM	1/min	
	MAP	In Hg	

6. MJERENJE:			
Komentar:	Mjerena veličina	Mjerna jedinica	Rezultat
	Lambda (λ)	N/A	
	CO	% vol.	
	CO ₂	% vol.	
	HC	ppm vol	
	O ₂	% vol.	
	COcor	% vol.	
	PEF	N/A	
	RPM	1/min	
	MAP	In Hg	

Dodatak 2: Primjeri ispitnih pitanja:

1. Napišite kako glasi Avogadrov zakon i navedite kratki primjer
2. Objasnite razliku između molekularne mase i molne mase.
3. Kako glasi definicija za mjernu jedinicu 1 kmol?
4. Kako glasi definicija normnog kubnog metra?
5. Definiraj opdu plisku konstantu i individualnu plinsku konstantu?
6. Napišite jedandžbu stanja plina, te opišite veličine u jednadžbi
7. Koliko iznosi opda plinska konstanta a koliko plinska konstanta za zrak?
8. Objasnite parcijalne tolakove i Daltonov zakon
9. Napišite koliko iznosi Opda plinska konstanta, te koliko znosi Individualna plinska konstanta za zrak.
10. Navedite vrste goriva za
 - a) klipne motore
 - b) mlazne motore
11. Navedite kolika je potrebna količina zraka potrebna za izgaranje 1 kg goriva
12. Definirajte "faktor bogatstva smjese", te napišite vrijednosti faktora bogatstva smjese i omjera goriva i zraka za bogatu, siromašnu i stehiometrijsku smjesu
13. Navedite sastav plinova izgaranja mlaznih motora prilikom idealnog izgaranja, te sastojke prilikom realnog izgaranja.
14. Navedite koji ispušni plinovi najviše utječu na stanje atmosfere
15. Navedite nekoliko zahtjeva koje moraju ispuniti komore izgaranja suvremenih mlaznih motora
16. Ukratko opišite mehanizme nastajanja štetnih plinova u komori izgaranja
17. Ukratko opišite konstrukcijska rješenja komore izgaranja u cilju smanjivanja emisije štetnih plinova
18. Navedite naziv ICAO propisa koji se bavi ispušnim plinovima te ukatko opišite sadržaj propisa.
19. Opišite zakonske propise u republici . Hrvatskoj vezane uz ispušne plinove.
20. Navedite glavni cilj Kyoto protokola, i na što se obvezuju zemlje potpisnice?
21. Ukratko objasnite što je to "trgovina emisijama" i koji joj je cilj?
22. Objasnite "četiri stupa" smanjenja emisija
23. Navedite područja ušteda putem učinkovitog trošenja goriva u cilju smanjenja emisija, te objasnite nekoliko primjera za svako područje

Dodatak 3: Popis završnih i diplomskih radova iz područja emisija zrakoplovnih motora, mentor Anita Domitrović, Fakultet prometnih znanosti

1. Čučević, Pero: Razvoj tehnoloških i operativnih karakteristika zrakoplova u cilju redukcije zrakoplovnih emisija, diplomski rad na dodiplomskom studiju prometa, smjer zračni promet, 2010. (zadan u okviru predmeta Tehnika i sigurnost zračnog prometa II)
2. Poljančić, Matej: Mjerenje i analiza ispušnih plinova zrakoplovnog klipnog motora, završni rad na preddiplomskom studiju aeronautike, 2011. (zadan u okviru predmeta Zrakoplovni pogonski sustavi I).
3. Kučić, Ozren: Upotrebljivost alternativnih goriva u komercijalnom zrakoplovstvu i utjecaj na okoliš, diplomski rad na dodiplomskom studiju prometa, smjer zračni promet, 2012. (zadan u okviru predmeta Tehnika i sigurnost zračnog prometa II).
4. Tukarić, Igor: analiza problema prisustva ispušnih plinova u kabini zrakoplova Katana DV, završni rad na preddiplomskom studiju aeronautike, 2012. (zadan u okviru predmeta Zrakoplovni pogonski sustavi I)
5. Kolašinac, Dino: Trgovanje stakleničkim plinovima u cilju smanjenja potrošnje goriva mlaznog zrakoplova, diplomski rad na diplomskom studiju prometa, smjer zračni promet, 2013. (zadan u okviru predmeta: Zrakoplovna prijevozna sredstva II)
6. Švragulja, Dino: Measures For Improving Fuel Efficiency By Implementing Electric Taxi System, Graduate Thesis, 2015. (Mjere za poboljšanje programa učinkovitog trošenja goriva primjenom sustava električnog voženja, diplomski rad na diplomskom studiju Aeronautike, napisan na engl. jeziku, zadan u okviru predmeta Zrakoplovne emisije.)
7. Pavlović, Marin: Utjecaj zahtjeva europske unije za trgovanje emisijama na poslovanje zračnog prijevoznika, diplomski rad na diplomskom studiju Aeronautike, 2017., zadan u okviru predmeta Zrakoplovne emisije.)