

# Analiza uvjeta zaleđivanja rasplinjača zrakoplovnog motora prema podacima iz eksploatacije

---

**Mišljenac, Natko**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2016**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:779949>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-27**



*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

**NATKO MIŠLJENAC**

**ANALIZA UVJETA ZALEĐIVANJA RASPLINJAČA  
ZRAKOPLOVNOG MOTORA PREMA PODACIMA IZ  
EKSPLOATACIJE**

**ZAVRŠNI RAD**

**ZAGREB, 2016.**

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**  
ODBOR ZA ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 20. travnja 2016.

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

**ZAVRŠNI ZADATAK br. 3793**

Pristupnik: **Natko Mišljenac (0066214738)**  
Studij: **Aeronautika**  
Smjer: **Pilot**  
Usmjerenje: **Civilni pilot**

Zadatak: **Analiza uvjeta zaleđivanja rasplinjača zrakoplovnog motora prema podacima iz eksploatacije**

Opis zadatka:

U radu potrebno je opisati sustav za usis zraka i odvođenje ispušnih plinova zrakoplovnog klipnog motora, na primjeru zrakoplova Cessna 172 i Katana DV20. Potrebno je objasniti vrste zaleđivanja koje se javljaju u usisnom dijelu motora te moguće posljedice. Potrebno je navesti konstrukcijska rješenja i načine rješavanja problema zaleđivanja u eksploataciji. Na kraju je potrebno, na temelju iskustva iz eksploatacije zrakoplova, navesti primjere uvjeta koji su doveli do zaleđivanja te objasniti operativne postupke pilota u tim uvjetima.

Zadatak uručen pristupniku: 4. ožujka 2016.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

---

doc. dr. sc. Anita Domitrović

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti

**ZAVRŠNI RAD**

**ANALIZA UVJETA ZALEĐIVANJA RASPLINJAČA  
ZRAKOPLOVNOG MOTORA PREMA PODACIMA IZ  
EKSPLOATACIJE**

**ANALYSIS OF THE CARBURETOR ICING CONDITION DUE  
TO AIRCRAFT OPERATION**

Mentor: Doc.dr.sc. Anita Domitrović

Student: Natko Mišljenac  
JMBAG: 0066214738

Zagreb, kolovoz, 2016.

# **ANALIZA UVJETA ZALEĐIVANJA RASPLINJAČA ZRAKOPLOVNOG MOTORA PREMA PODACIMA IZ EKSPLOATACIJE ZRAKOPLOVA**

## **SAŽETAK**

Zaleđivanje sustava za usis zraka na zrakoplovima predstavlja vrlo veliku, realnu i teško primjetnu opasnost koja može dovesti do ozbiljnih posljedica ako joj se ne pristupi pravovremeno i ispravno. Mnogi zrakoplovi i piloti doživjeli su nezgode upravo zbog zaleđivanja sustava usisa zraka. Sustav za usis zraka je vitalan dio za rad zrakoplovnog motora jer je za izgaranje unutar motora uz gorivo potreban i zrak. Nakupljeni led unutar sustava može dovesti do začepljenja dovoda zraka i potencijalno katastrofalnih posljedica. Kako bi se ta mogućost smanjila, konstrukcijski je ugrađena mogućost grijanja usisnog sustava pomoću ispušnih plinova u cilju sprječavanja stvaranja leda i mogućeg topljenja leda ukoliko se zaleđivanje dogodi.

**KLJUČNE RIJEČI:** zaleđivanje rasplinjača, zrakoplovi; sustav za usis zraka; zrakoplovni klipni motor

# **ANALYSIS OF THE CARBURETOR ICING DUE TO AIRCRAFT OPERATION**

## **SUMMARY**

Icing of air intake system on aircrafts represents highly realistic and difficult to recognize danger that can lead to serious consequences if it's not addressed correctly and on time. Many aircraft and pilots have had accidents due to intake icing. Air intake system is vital part of internal combustion engine because it is necessary for the explosions inside the engine. In event that air is not delivered to engine, explosion cannot take place, and the engine will stop. That would be one of the worst case scenarios that pilot can imagine. Due that possibility it is necessary to give special attention to this problem, because ice build-up can lead to air cut-off which could lead to catastrophic events. In order to reduce that possibility, construction solutions based on intake heating by exhaust gases to prevent icing and to melt any ice build-up if necessary.

**KEY WORDS:** carburetor icing; aircraft; air intake system; aircraft piston engine

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. OPIS SUSTAVA ZA USIS ZRAKA I ODVOĐENJA ISPUŠNIH .....	2
2.1. Usisni sustav .....	3
2.1.1. Pročistač zraka.....	4
2.1.2. Usisna cijev .....	6
2.1.3. Rasplinjač .....	7
2.2. Ispušni sustav zajedno s izmjenjivačem topline .....	9
2.3. Uređaj protiv zaleđivanja .....	12
3. VRSTE ZALEĐIVANJA USISNOG SUSTAVA .....	16
3.1. Zaleđivanje nastalo isparivanjem goriva. ....	16
3.2. Zaleđivanje zaklopke gasa.....	17
3.3. Udarni led.....	18
4. UVJETI KOJI DOVODE DO ZALEĐIVANJA.....	20
4.1. Nepovoljni vremenski uvjeti za let.....	20
4.2. Povoljni vremenski uvjeti za let .....	21
5. ISKUSTVA IZ EKSPLOATACIJE .....	23
5.1. Zamrzavanje u školskom krugu.....	23
5.2. Zamrzavanje tijekom izvođenja vježbe „One.....	23
5.3. Zamrzavanje tijekom IFR ispitnog leta .....	25
5.4. Tragični ishod zamrzavanja rasplinjača .....	25
6. ZAKLJUČAK.....	27
LITERATURA.....	28
POPIS SLIKA .....	29

# 1. UVOD

Zrakoplovstvo je danas usprkos raširenim mišljenjima jedan od najsigurnijih, najbržih, tehnološki najnaprednijih načina prijevoza. Kroz povijest i razvitak zrakoplovstva kao grane putničkog i teretnog prijevoza, sukladno naučenim znanjima iz eksploatacije, tehnologija se usavršavala i prilagođavala vrstama zrakoplova i zadaćama za koje su namijenjeni. Upravo se tom težnjom daljnjem razvitku i kontinuiranim usavršavanjem postigla zavidna razina sigurnosti i učinkovitosti. Usprkos tome, određeni atmosferski ili drugi prirodni uvjeti mogu dovesti do neispravnosti nekih od sustava zrakoplova.

U ovom radu analizira se primjer takve neispravnosti nastale kao rezultat nepovoljnih vremenskih uvjeta na zrakoplovima generalne avijacije s klipnim motorom tj. analiza uvjeta koji dovode do zaleđivanja rasplinjača prilikom eksploatacije zrakoplova. Kao primjer u radu uzet će se zrakoplovi Cessna 172 N (u daljnjem tekstu C172 N) te Diamond Katana DV20 (u daljnjem tekstu DV20) koji su najčešće korišteni zrakoplovi za školovanje pilota.

Završni rad se sastoji od šest poglavlja u kojima će se objasniti i opisati uvjeti, pod kojima dolazi do otkaza pojedinih komponenti usisnog sustava kao i funkcija svake pojedine komponente usisnog sustava, te na primjerima prikazati navedena problematika.

Uvodni dio daje uvid u tematiku rada u cjelini te naznačuje tematiku svakog pojedinog poglavlja.

U drugom poglavlju opisan je sustav za usis zraka i sustav za odvođenje ispušnih plinova zrakoplovnog klipnog motora. Sustavi su objašnjeni i opisani u cijelini kao i prema zasebnim komponentama koje ga čine. Objašnjena je njihova svrha u zrakoplovu, te zadaće svakog od dijelova navedenih sustava. Navedeni su primjeri izvedbi dijelova sustava na motorima zrakoplova C172 i DV20.

Treće poglavlje bavi se zaleđivanjem usisnog sustava zrakoplovnih klipnih motora. Navedene su i opisane vrste zaleđivanja i preduvjeti koji moraju biti ostvareni za nastanak zaleđivanja. Također će biti navedeno na kojim se dijelovima usisnog sustava navedeni oblik zaleđivanja pojavljuje, te koje posljedice donosi njegovo nakupljanje.

Četvrto poglavlje donosi uvjete u kojima dolazi do zaleđivanja: koje sve vremenske prilike i atmosferski uvjeti mogu dovesti do zaleđivanja usisnog sustava, te u kojim sve režimima leta može doći do zaleđivanja. Također se opisuju radnje i postupci kojima se može spriječiti zaleđivanje usisnog sustava te spriječiti eventualni otkaz.

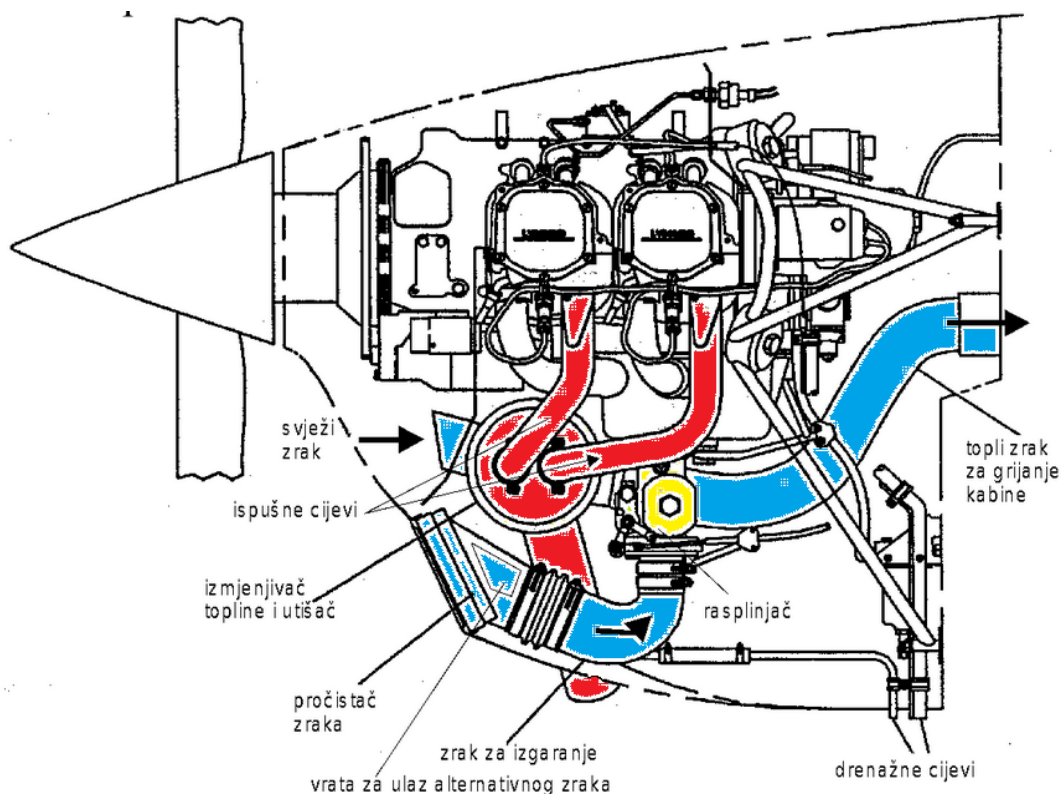
Peto i posljednje poglavlje prije zaključka obrađuje iskustva iz eksploatacije zrakoplova. Navedene su izjave i iskustva osoba koje su se tijekom svoje letačke karijere susrele s zaleđivanjem rasplinjača tijekom leta: u kojim segmentima leta je problem zaleđivanja nastao, što je dovelo do njega, te koje su postupke piloti primijenili kako bi otklonili nastali problem.

Zaključak će zaokružiti cjelokupnu analizu uvjeta koji dovode do zaleđivanja, te što se iz rada može zaključiti i naučiti kako bi se takve situacije u budućnosti rjeđe događale.

## 2. OPIS SUSTAVA ZA USIS ZRAKA I ODVOĐENJA ISPUŠNIH PLINOVA ZRAKOPLOVNOG KLIPNOG MOTORA

Sustav za usis i odvođenje ispušnih plinova, jedan je od vitalnih elemenata svakog motora s unutarnjim izgaranjem, pa tako i kod zrakoplovnih klipnih motora. Proces rada četverotaktnog motora sastoji se od: usisa svježe smjese zraka i goriva, kompresije, izgaranja i ekspanzije, te istiskivanja plinova kao produkta izgaranja iz cilindra. Zrak i gorivo dva su osnovna elementa koja omogućuju rad motora. Gorivni sustav zrakoplovnog klipnog motora je zasebni sustav te neće biti obrađen u ovom radu. Za razliku od goriva koje se nalazi unutar samog zrakoplova, zrak kao drugi element potreban za izgaranje potrebno je usisnim sustavom iz atmosfere dopremiti do rasplinjača koji s gorivom pravi smjesu spremnu za izgaranje u cilindru.

Produkti izgaranja rezultat su izgaranja smjese u cilindrima motora te se u obliku ispušnih plinova taktom ispuha vode izvan motora kroz ispušni ventil i ispušni sustav u cijelini. Ispušni sustav sastoji se od sklopa ispušnih cijevi koje produkte izgaranja od cilindra vode preko izmjenjivača topline i utišivača (prigušivača), te se od tamo kroz ispušnu cijev prosljeđuju nazad u atmosferu.



**Slika 1: Sustavi usisa i ispuha zraka**

Izvor: [1]

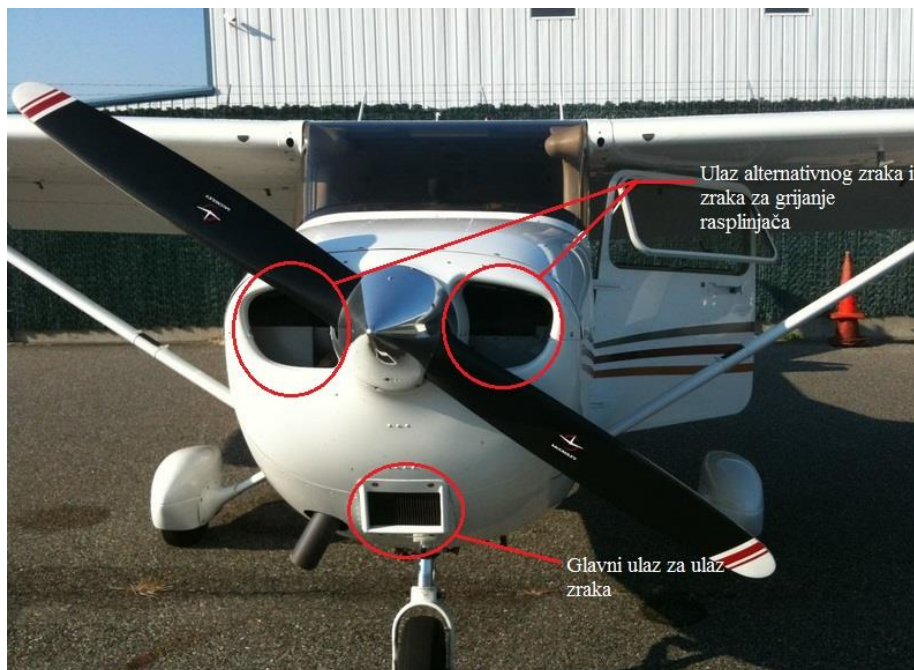


Na slici 1 plavom bojom su označeni dijelovi usisnog sustava: pročistač zraka, vrata za ulaz alternativnog zraka, ulaz svježeg zraka, te dovod toplog zraka za grijanje kabine. Crvenom bojom označeni su elementi ispušnog sustava: ispušne cijevi, izmjenjivač topline i utišivač, dok je žutom bojom označen rasplinjač.

U nastavku ovog poglavlja opisuju se dijelovi usisnog i ispušnog sustava motora, na primjeru zrakoplova C172 i DA20.

## 2.1. Usisni sustav

Zrakoplovi s klipnim motorima generalne avijacije opremljeni su s dvije vrste otvora za zrak, glavnim ulazom za zrak i ulazom alternativnog zraka.



**Slika 2: Prikaz ulaza glavnog i alternativnog zraka**

Izvor: <http://www.airport-data.com/images/aircraft/small/000/364/364167.jpg>

Na slici 2 prikazani su dijelovi usisnog sustava motora zrakoplova C172. Crvenom bojom označeni su glavni i alternativni ulazi zraka. Vidljiva je razlika u veličini glavnog ulaza za zrak i alternativnog ulaza za zrak. Dok glavni ulaz zraka ima specifičnu zadaću dovođenja zraka iz okoline u unutrašnjost motora, alternativni ulaz zraka uz dovođenje alternativnog zraka u slučaju začepljenja glavnog ulaza, nosi i zadaću hlađenja motora te dovođenje zraka za grijanje kabine.

Zadaća usisnog sustava je dovesti zrak iz atmosfere, kroz usisnu cijev uvesti unutar motora te dovesti do rasplinjača gdje će biti pomiješan s gorivom. Od tamo smjesu goriva i zraka usisni sustav doprema kroz usisni ventil do cilindra gdje će se odviti daljnji procesi kompresije, izgaranja, ekspanzije i ispuha.

Zrakoplovni sustav za usis zraka sastoji se od rasplinjača, pročistača, te usisne cijevi koja doprema zrak do rasplinjača i usisnog razvodnika. Uz njih postoje još i uređaj za odleđivanje rasplinjača, uređaj za dovodjenje alternativnoga zraka te instrument za mjerenje temperature smjese u rasplinjaču (*CAT-Carburator Air Temperature*). Ti elementi zajednički formiraju dugački zakrivljeni kanal koji doprema zrak do rasplinjača, a od rasplinjača smjesu goriva i zraka do cilindra.

Najčešće motori koji se koriste u malim zrakoplovima ne koriste sustav za prednabijanje te se stoga klasificiraju kao atmosferski ili usisni motori (*Engl. Naturally Aspirated Engine*). Atmosferski motori korišteni u malim zrakoplovima mogu biti opremljeni ili rasplinjačem ili direktnim ubrizgavanjem. Razlika dva navedena načina snabdijevanja motora s unutarnjim izgaranjem gorivom je u tome što se kod motora s rasplinjačem u cilindar dovodi gotova smjesa goriva i zraka, dok se kod motora s direktnim ubrizgavanjem, zrak dovodi putem usisne cijevi, prolazeći kroz difuzor i preko zaklopke, a gorivo se ubrizgava u usisnu granu ispred usisnog ventila.

### 2.1.1. Pročistač zraka

Zrakoplovi generalne avijacije s klipnim motorima često lete i izvršavaju operacije na travnatim, zemljanim, pjeskovitim i drugim aerodromskim terenima na kojima ima mnogo prašine, pijeska, trave i ostalih mogućih onečišćenja. Takva onečišćenja štete unutrašnjosti motora tj. pridonose povećanom trošenju elemenata motora, a mogu dovesti i do neispravnosti u radu motora. Kako bi se spriječilo uvođenje nečistoća unutar motora, zadužen je pročistač zraka. "Zadaća pročistača zraka je pročistiti zrak od prašine pijeska i sličnih abrazivnih onečišćenja koje pomažu trošenju klipno cilindarske skupine. Stari modeli motora koriste se žičanim pročistačima. Današnji se pročistači zraka izrađuju obliku papirnih suhих pročistača i od poliuretanske pjene. Papirni se pročistači čiste propuhivanjem zrakom na primjer svakih 50 sati i tako održavaju. Navedeni pročistači se zamjenjuju svakih 100 sati rada motora ili nakon godinu dana. Za neke vrste pročistača predviđa se pranje u vodi s blagim deterdžentom. Takvi se pročistači mijenjaju nakon 500 sati rada. Poliuretanski pjenasti pročistači se ne čiste već isključivo mijenjaju svakih 100 do 200 sati" [1].

Na slici 3 prikazan je pročistač zraka na usisnoj grani motora zrakoplova C172, a na slici 4 pročistač zraka na zrakoplovu Katana DV20. Na slikama se vidi zaštitna mrežica ispred pročistača s funkcijom sprječavanja oštećenja pročistača i lakšeg uklanjanja nečistoća.



**Slika 3: Pročistač zraka za C172**

Izvor: <http://d2dslulmm3ln9j.cloudfront.net/donaldson-p198281-filter-air-panel-intake-172r-172s-oem-p-n-p198281-ca.jpg>



**Slika 4: Pogled na pročistač usisnog sustava DV20**

Izvor: Zbirka fotografija autora rada, fotografirano u HZNS-u, Zagreb, lipanj, 2016

Ukoliko nepažnja ili nepovoljni uvjeti, npr. nečistoće ili led, dovedu do začepjenosti glavnog pročistača, protok zraka postat će nedovoljan ili čak u potpunosti onemogućen. U tu svrhu napravljen je alternativan ulaz zraka kako bi se otklonila mogućnost zastoja rada motora u slučaju začepjenosti glavnog pročistača. Na slici 5. vidi se otvor za ulaz alternativnog zraka. Vidljiva je i usisna cijev motora s koje su skinuti pročistač i mrežica u postupku održavanja zrakoplova te je vidljiva ispušna cijev za odvođenje ispušnih plinova

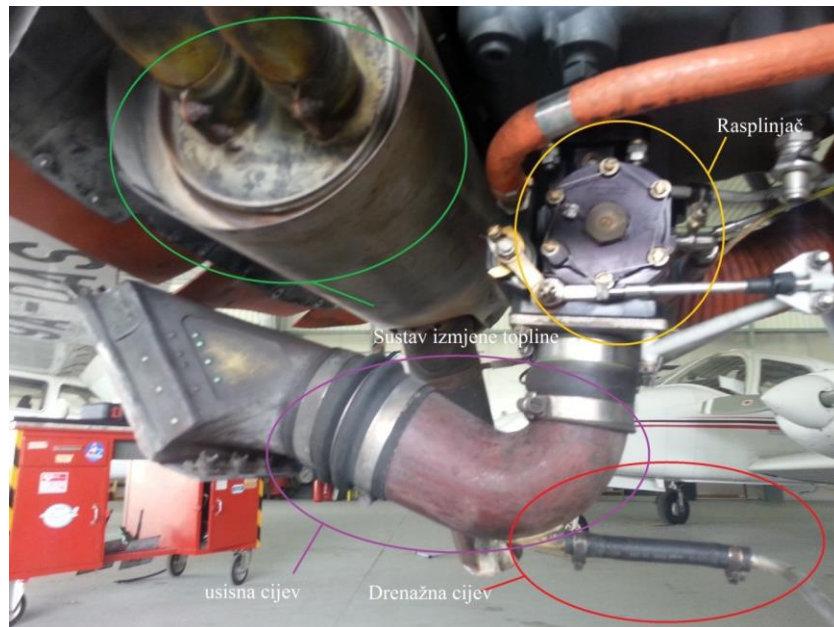


**Slika 5: Pogled na dijelove usisnog i ispušnog sustava C172**

Izvor: Autor, zbirka fotografija autora rada, fotografirano u HZNS-u, Zagreb, lipanj, 2016

### 2.1.2. Usisna cijev

Nakon pročistača sa zaštitnom mrežicom, usisni sustav se nastavlja s usisnom cijevi. Cijev se nakon zračnog pročistača sastoji do pomičnih i nepomičnih dijelova cijevi. Usisna cijev je glavni element usisnog sustava te su na njoj ugrađeni svi ostali elementi usisnog sustava. Nepomični elementi usisne cijevi napravljeni su najčešće od aluminiija dok su pomični dijelovi napravljeni najčešće od savitljive plastike kako bi se lakše prilagodila u unutrašnjosti kućišta motora. Prije nego dođe do rasplinjača, na usisnoj cijevi nalazi se ventil hladnog i ventil toplog zraka. Ventil toplog zraka ima zadaću provođenja zagrijanog zraka do rasplinjača te se njime upravlja iz pilotske kabine pomoću ručice za grijanje rasplinjača. Na nekim zrakoplovim na kraju usisne cijevi prije ulaza u rasplinjač mogu se naći instalacije za mjerenje temperature zraka koji ulazi u rasplinjač (CAT - *Ccarburator Air Temperature*). Nakon pripreme smjese u rasplinjaču, smjesa zraka i goriva je distribuirana u svaki cilindar zasebnim usisnim granama do svakog cilindra.



**Slika 6: Usisni sustav motora na zrakoplovu C172**

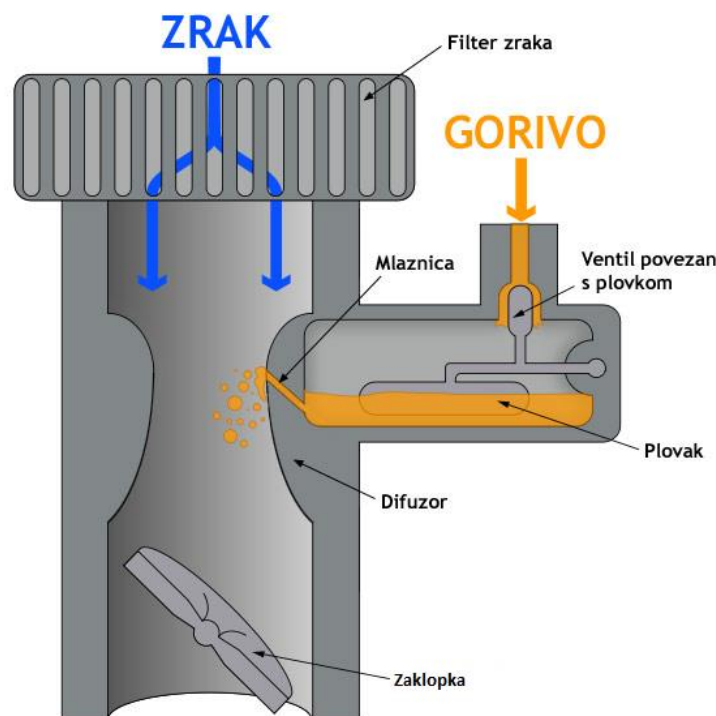
Izvor: Autor, zbirka fotografija autora rada, fotografirano u HZNS-u, Zagreb, lipanj, 2016

Slika 6 prikazuje dio usisnog i ispušnog sustava te neke od njihovih elemenata na motoru zrakoplova C172. Prikazani elementi usisnog sustava su: glavni ulaz zraka koji se nastavlja na usisnu cijev i rasplinjač te drenažnu cijev, dok je od ispušnog sustava prikazan izmjenjivač topline. Drenažna cijev nalazi se na najnižem dijelu usisne cijevi te služi sakupljanju i ocjeđivanju vlage i kondenzata nastalih unutar usisne cijevi. Odvođenje vlage i kondenzata također uvelike pripomaže sprječavanju eventualnog nastanka leda.

Usisna cijev postavljena je u struji zraka na način da koristi dinamičko prednabijanje zraka koje nastaje zbog brzine leta zrakoplova. Porast snage zbog ovog efekta može biti oko 5% snage u odnosu na snagu pri mirovanju motora [1].

### 2.1.3. Rasplinjač

Kao glavni element usisnog sustava detaljnije će biti opisan i objašnjen rasplinjač. „Rasplinjač (u nekoj literaturi na hrvatskom navodi se kao „karburator“, od engl. *carburetor*), je uređaj u kojem se priprema, odnosno, miješa smjesa goriva i zraka kod benzinskih, odnosno, otto motora. Princip rada rasplinjača vidljiv na slici 7. Gorivo se iz spremnika dovodi u komoru s plovkom koji regulira dotok goriva, iz koje se kroz difuzor (Venturijeva cijev) raspršuje i miješa u određenom omjeru sa zrakom, te naposljetku usisava u motor gdje izgara"[2].



Slika 7: Rasplinjač

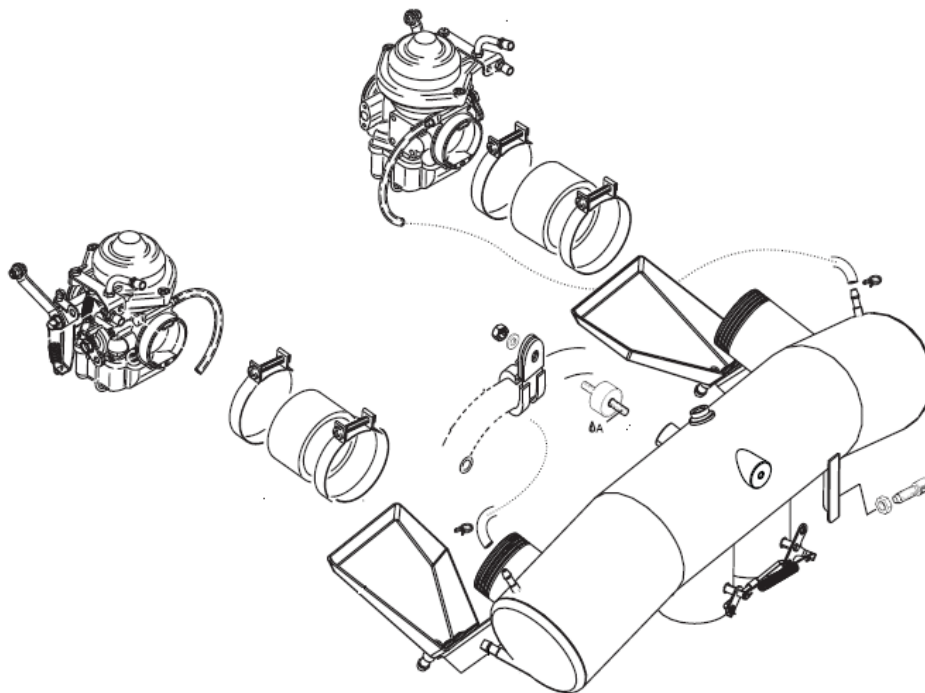
Izvor: <http://www.jofair.com/news/pics/aircraft-powerplant/carburetor.gif>

Pri polijetanju i penjanju zrakoplova te pri slijetanju poluga smjese postavlja se u položaj bogate smjese (*Full Rich*). U tom režimu rada smjesa je bogatija nego što je potrebno za dobivanje najveće snage. Tako bogatom smjesom postiže se unutarnje hlađenje čime se smanjuje opasnost od detonacijskog izgaranja. Pri slijetanju bogata smjesa je potrebna zbog mogućnosti da se svako slijetanje zbog nepredvidivih situacija može prekinuti i pretvoriti u polijetanje pri čemu je potrebno naglo povećanje snage. Krstarenje se najčešće obavlja sa 75% snage motora. Za takav režim leta smjesa se može podesiti za najveću snagu (*Best Power Mixture*) i najveću ekonomičnost (*Best Economy Mixture*). Korištenjem bogatije smjese povećana je potrošnja goriva ali i intenzivne onečišćenje elektroda svjećica što može imati za posljedicu izostanak iskre dok je siromašna smjesa sklonija detonacije i nestabilnom radu

motora. „Najpovoljnije izgaranje gorive smjese odvija se pri omjeru goriva (benzina) i zraka 1:15. Rasplinjači su tako konstruirani da daju motoru smjesu bogatiju gorivom pri puštanju u pogon i pri punom opterećenju, a jeftinu (ekonomičnu) smjesu pri opterećenju od 60% do 70% snage."[3]. Rasplinjači su normalno kalibrirani na razini mora, a ispravan omjer zraka i goriva postavljen je kontrolom smjese u poziciju bogate smjese (*full rich*) na visini mora.

Rasplinjač je uređaj motora posebno osjetljiv na zaleđivanje ukoliko se zrakoplovne operacije ne izvode na ispravan način. Motor zrakoplova C172 N (Lycoming O-320-H2AD) opremljen je rasplinjačem, dok je C172 R (Lycoming IO-360-L2A) opremljena sustavom s ubrizgavanjem. Motori s ubrizgavanjem imaju određene prednosti nad motorima s rasplinjačem, jer kod motora s ubrizgavanjem ne dolazi do isparavanja goriva u difuzoru, što umanjuje mogućnost zaleđivanja rasplinjača, o čemu će biti govora u sljedećem poglavlju.

Motor zrakoplova DV20 (Rotax 912 S) opremljen je sa dva rasplinjača kako je prikazano na slici 8. Svaki rasplinjač snabdjeva dva cilindra sa smjesom goriva i zraka. Slika 8 prikazuje rasplinjače koji se nalazi unutar jednog motora serije 912S, te način spajanja s dovodom zraka.



**Slika 8: Rasplinjači i dovod goriva za motor 912S**

Izvor: Rotax 912 Series Instalation Manual, Rotax Aircraft Engines, 2012.

Obzirom da koriste sustav napajanja gorivom pomoću rasplinjača motori zrakoplova C172 N i DV20 moraju imati uređaj za grijanje rasplinjača, odnosno sustav protiv zaleđivanja rasplinjača i usisnog sustava motora. Uređaj za grijanje rasplinjača koristi topli zrak iz ispušnog sustava motora, pa se prvo objašnjava ispušni sustav.

## 2.2. Ispušni sustav zajedno s izmjenjivačem topline

Nakon izgaranja smjese u cilindru motora, produkti izgaranja, tj. ispušni plinovi izvode se iz motora pomoću ispušnog sustava. Ispušni sustavi kao glavnu zadaću imaju sakupljanje i odvođenje plinova koji nastaju kao produkt izgaranja tijekom rada motora. Uz primarnu zadaću odvođenja ispušnih plinova, ispušni sustav ima zadaću zagrijavanja zraka koji se dalje koristi kao zrak za grijanje usisnog sustava te za grijanje kabine. Moderni ispušni sustavi iako vrlo lagani, vrlo su otporni na visoke temperature, koroziju i vibracije koje nastaju tijekom operacija zrakoplova. Ispušni sustav započinje s cijevi koja je postavljena iznad ispušnih ventila cilindra, kako bi produkti izgaranja nakon otvaranja ventila mogli izaći iz cilindra. Svaki cilindar ima zasebnu ispušnu cijev. Na primjeru motora C172, cijevi se spajaju kroz dva kolektora sa svake strane bloka motora do zajedničkog spoja koji tvori jednu zajedničku ispušnu cijev čija je zadaća odvođenje ispušnih plinova iz sva četiri cilindra.



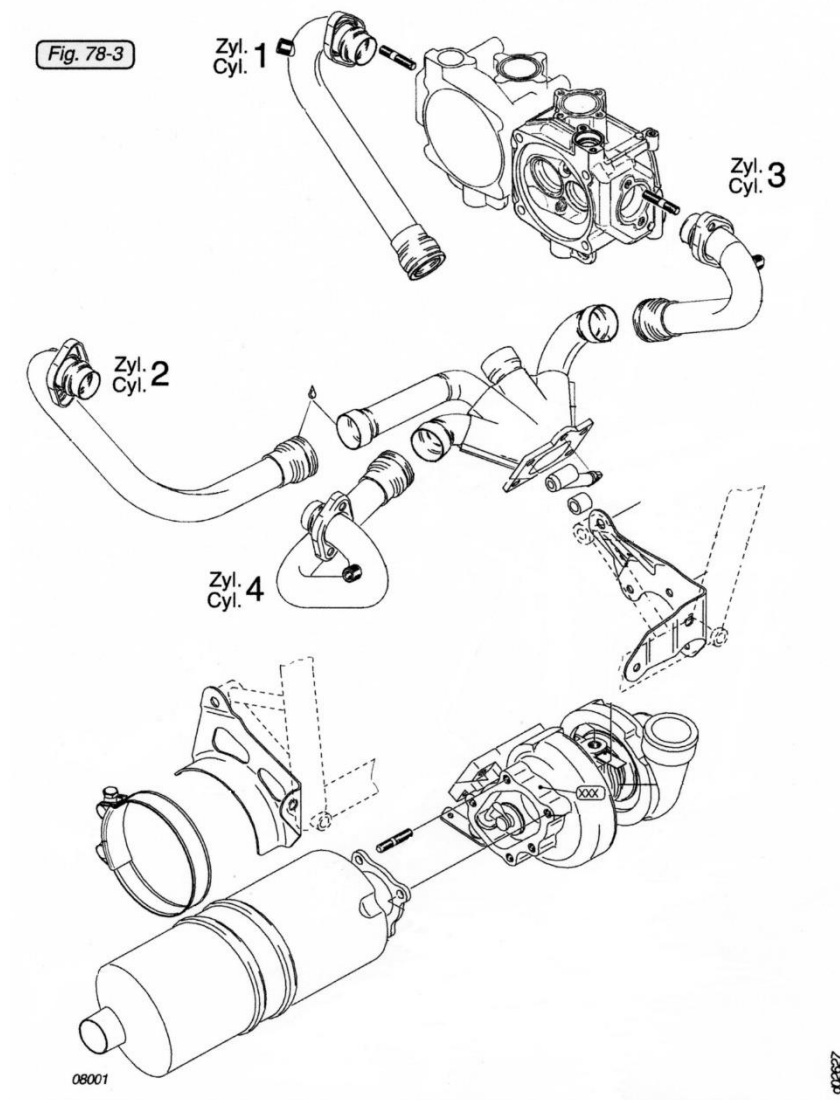
**Slika 9: Ispušni sustav C172**

Izvor: [https://www.powerflowsystems.com/images/products/lg\\_Cessna\\_172\\_4.jpg](https://www.powerflowsystems.com/images/products/lg_Cessna_172_4.jpg)

Slika 9 prikazuje motor zrakoplova C172. Na slici su jasno vidljivi elementi ispušnog sustava s izlazom koji vodi ispušne plinove nazad u atmosferu. Također osim glavne zadaće odvođenja plinova, ispušni sustav mora i smanjiti buku prilikom ispuha. Moderni ispušni sustavi na svom kraju imaju prigušivače (utišivače) čija je svrha smanjenje buke. Osim prigušivanja buke, prigušivači nose i zadaću izmjenjivača topline.

Ispušni sustav zrakoplova DV 20 smatra se jednostavnim oblikom ispušnog sustava kakav se koristi u većini malih zrakoplova. Slično kao kod motora na C172, ispušne cijevi spojene su na cilindre motora te dalje koje odvede ispušne plinove u zajedničku ispušnu

cijev (ispušni lonac), slika 10. Na ispušni lonac je spojena cijev za odvođenje produkata izgaranja izvan motora. Ispušni lonac se sastoji od dva dijela – prigušivača (eng. *muffler*) i omotača (eng. *cover*). Prigušivač, kako je već napomenuto, služi za redukciju buke i akumulaciju ispušnih plinova. Omotač je zaobljena metalna ploča koja se nalazi oko prigušivača, a između njih se nalazi prostor kroz koji struji zrak (izmjenjivač topline koji se opisuje u nastavku). Taj zrak se zagrijava i može se koristiti za grijanje pilotske kabine te u uređaju za grijanje rasplinjača.

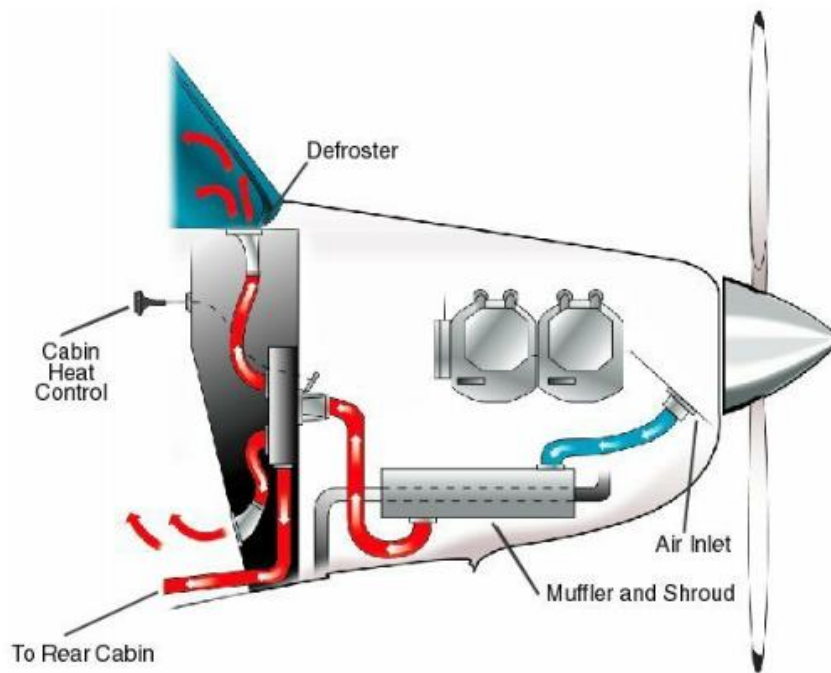


**Slika 10: Ispušni sustav DV20**

Izvor: Rotax 912 Series Instalation Manual, Rotax Aircraft Engines, 2012.

Izmjenjivači topline su sklopovi koji toplinu ispušnih plinova koriste kako bi zagrijali svježiji zrak koji se koristi za grijanje rasplinjača te za grijanje kabine. Kako bi zagrijao kabinu vanjski zrak je uvučen kroz alternativni usisni sustav, kanaliziran preko izmjenjivača topline te proslijeđen u kabinu, slika 11.

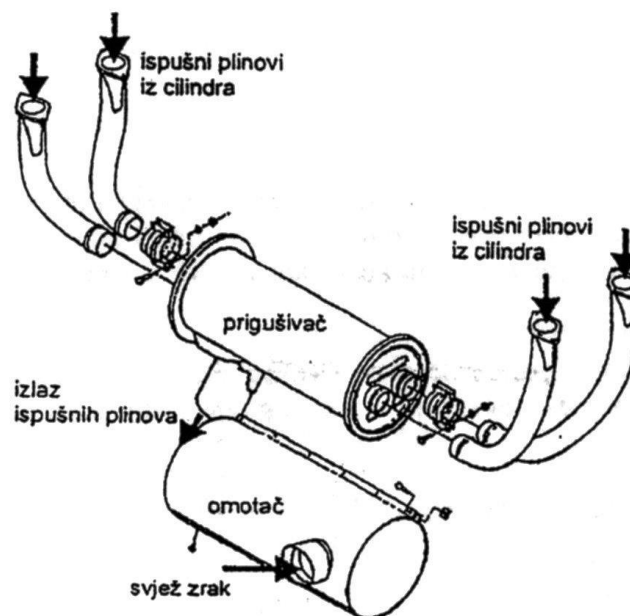




**Slika 11: Sustav grijanja kabine**

Izvor Domitrović, A., Nastavni materijali iz zrakoplovnih klipnih motora, FPZ, 2014.:

Izmjenjivač topline funkcionira na principu zagrijavanja svježeg zraka pomoću topline ispušnih plinova. Funkcionira ujedno kao i prigušivač buke, a konstruiran je kao ispušni lonac s dvije oplata, kako je vidljivo na slici 12.



**Slika 12: Ispušni sustav malog zrakoplova**

Izvor [1]

Unutar prve oplate struje ispušni plinovi kao produkti izgaranja, dok se između prve i druge oplate nalazi međuprostor sa svježim zrakom. Ispušni plinovi su vrlo vrući prilikom izlaska iz cilindra i prolaska kroz ispušni sustav te svojim strujanjem zagrijavaju unutarnju uplatu izmjenjivača topline. Zagrijavanjem unutarnje oplate zagrijava se i zrak koji se nalazi između dvije oplate. Kontrola toplog zraka omogućena je pomoću poluge koja kontrolira ventil toplog zraka, a omogućena je iz unutrašnjosti kabine. Kako su ispušni plinovi i svježi zrak u potpunosti odvojeni nema opasnosti da bi se mogli pomiješati, osim u slučaju napuknuća ili proboja. Unatoč jednostavnoj konstrukciji ispušnog sustava posebno je važno tijekom pregleda motora u održavanju obratiti pozornost na njegovu ispravnost. Zbog izloženosti visokim temperaturnim promjenama i vibracijama na cijevima ispušnog sustava i izmjenjivača topline, mogu se pojaviti zamorne pukotine. U oštećenom izmjenjivaču topline može doći do miješanja ispušnih plinova i svježeg zraka koji služi za grijanje kabine, te na taj način otrovni ispušni plinovi mogu doći unutar kabine zrakoplova, a propuštanje vrućih ispušnih plinova u motornom prostoru može prouzročiti požar. Zbog opasnosti od puknuća izmjenjivača topline, koji bi u tom slučaju ispuštao ugljikov monoksid (CO) i miješao ga sa svježim zrakom koji se doprema u kabinu, u kabini su ugrađeni detektori CO jer je to bezbojan plin bez mirisa i okusa, te bi ga bez detektora bilo vrlo teško otkriti, slika 13.



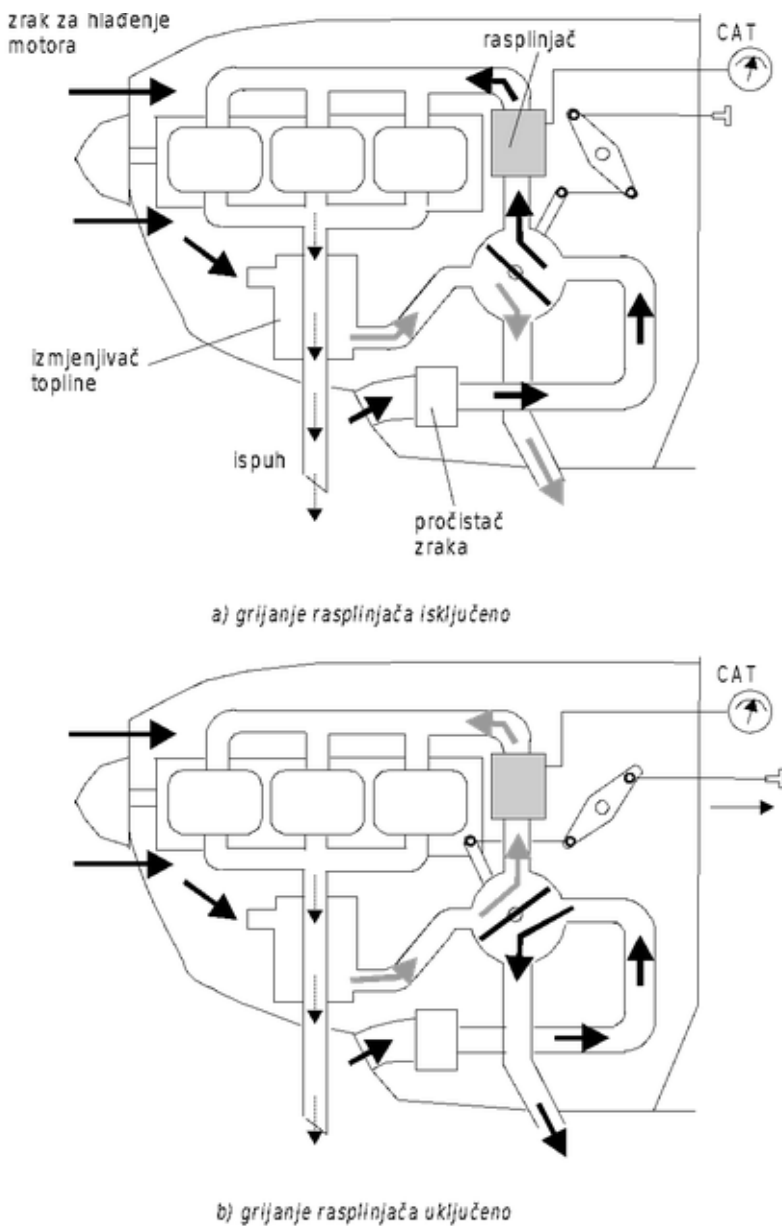
**Slika 13: Detektor ugljikovog monoksida (popularno poznat kao „žuta tableta“)**

Izvor: [http://www.bestglide.com/CO\\_Detector\\_Info.html](http://www.bestglide.com/CO_Detector_Info.html)

### **2.3. Uređaj protiv zaleđivanja**

Uređaj protiv zaleđivanja rasplinjača, odnosno, uređaj za grijanje usisnog sustava povezan je preko zračnog ventila koji je direktno vezan na sustav izmjenjivača topline s jedne strane i ventila s druge strane. Ventil je lociran ispod rasplinjača, te se preko njega može upravljati protokom toplog zraka iz unutrašnjosti pilotske kabine. Osnovna namjena dovođenja toplog zraka je prevencija zaleđivanja rasplinjača. Uređaj protiv zaleđivanja sprječava nastanak leda u usisnom sustavu ili te se koristi za otapanje leda ako je nastao u usisnom sustavu ili rasplinjaču. Zračni ventil rasplinjača dovodi zrak izvana prilikom normalnih operacija, dok po potrebi u uvjetima pri kojima bi moglo doći do zaleđivanja rasplinjača dovodi topli zrak iz unutrašnjosti motora.

Uređaj za grijanje rasplinjača prikazan je na slici 14. Na slici je vidljivo dovođenje zraka u slučaju normalnog rada motora, odnosno, u slučaju uključenog sustava protiv zaleđivanja.



**Slika 14: Sustav grijanja rasplinjača**

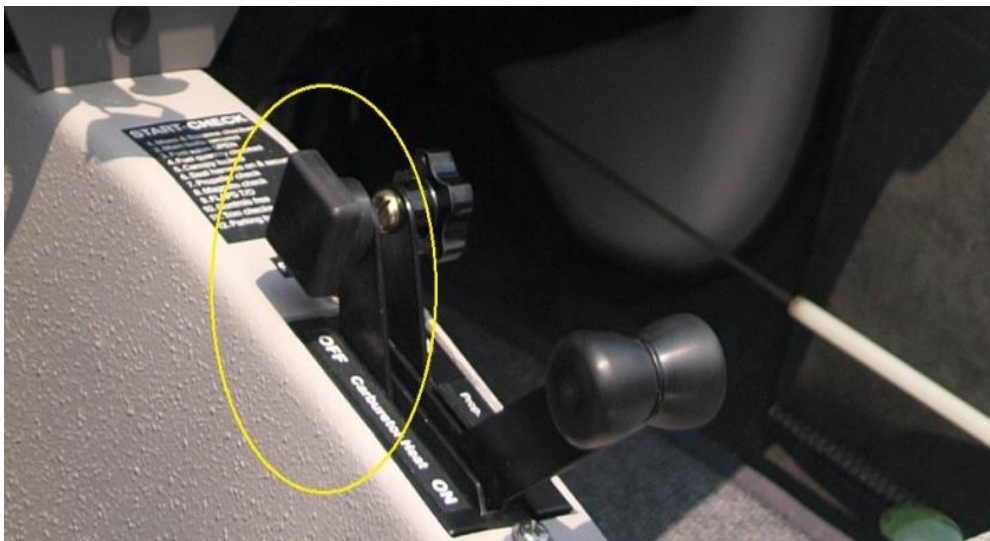
Izvor [1]

Polugom ventila dovoda toplog zraka upravlja se ručicom koja se nalazi u kokpitu. Na taj način se ventil koji dovodi hladan zrak iz okoline zatvara, te se otvara ventil toplog zraka koji struji u rasplinjač. Na slikama 15 i 16 prikazane su komande pilota za upravljanje uređajem za grijanje rasplinjača na zrakoplovu C172 (Slika 15), odnosno zrakoplovu DV20 (Slika 16).



**Slika 15: Ručica grijanja rasplinjača na zrakoplovu C172**

Izvor: <http://www.airliners.net/photo/FSA-Fliegerschule-St-Gallen-Altenrhein/Cessna-172N-Skyhawk-100-II/636017>



**Slika 16: Ručica grijanja rasplinjača na zrakoplovu DV20**

Izvor Domitrović, A.: Nastavni materijali iz zrakoplovnih klipnih motora, FPZ, 2014.

Zrak koji je zagrijan dolazi iz unutrašnjosti motora, ali ne prolazi kroz pročištače te se stoga ne preporučuje dugo korištenje. Korištenje potpunog grijanja rasplinjača na najjačoj snazi rezultirat će u gubitku otprilike 100-225 RPM-a [2].

Nadzor grijanja rasplinjača vrši preko instrumenta CAT (*Carburetor Air Temperature*) koji mjeri temperaturu zraka preko senzora koji se nalazi u usisnoj cijevi prije ulaza u rasplinjač. Temperatura koju prikazuje CAT daje doznanja pilotu ima li opasnosti od formiranja leda u usisnom sustavu. Ukoliko je temperatura preniska, potrebno je iz predostrožnosti upaliti grijanje rasplinjača kako bi se spriječilo eventualno nakupljanje leda. Na slici 17. prikazan je instrument CAT na zrakoplovu C172.



**Slika 17: Instrument CAT na zrakoplovu C172**

Izvor: <http://www.aircraftspruce.com/cache/370-320-/catalog/graphics/10-00950.jpg>

### 3. VRSTE ZALEĐIVANJA USISNOG SUSTAVA

Zaleđivanje usisnog sustava predstavlja opasnost za sigurnu operaciju zrakoplova jer osim što može bitno poremetiti odnos zraka i goriva, pri čemu dolazi do smanjenja performansi zrakoplova, također može u potpunosti prekinuti dovod zraka do rasplinjača, odnosno, smjese iz rasplinjača. Led se može formirati u usisnom sustavu u svim režimima i uvjetima leta; kroz oblake, maglu, kišu, susnežicu, snijeg ili čak i kroz čisti zrak na 20 do 30°C ako ima velikog udjela vlage u zraku (50 %) [1]. Zaleđivanje na usisnom sustavu može generalno biti klasificirano kao tri tipa zaleđivanja: udarni led (engl. *Impact Ice*), led nastao isparivanjem goriva (engl. *Fuel Evaporation Ice*) ili led oko zaklopke (engl. *Throttle Ice*) [1]. Pojedine vrste zaleđivanja biti će kasnije nešto detaljnije objašnjene.

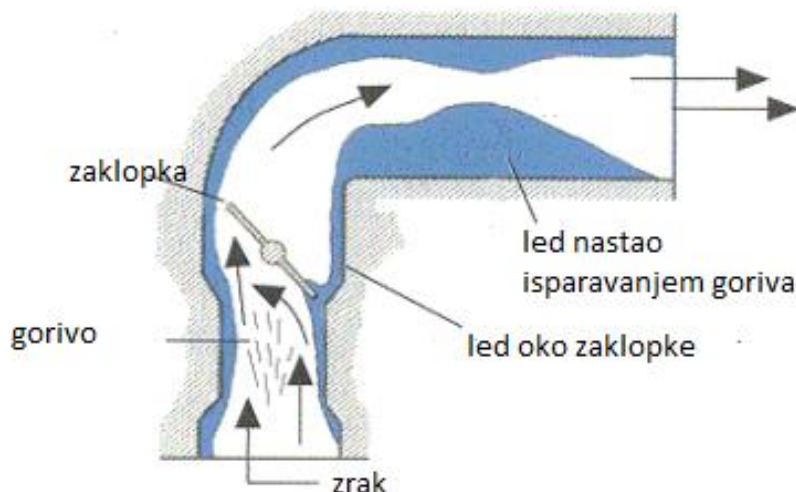
Zaleđivanje usisnog sustava može biti spriječeno ili mu se smanjiti utjecaj povećavanjem temperature zraka koji prolazi kroz sustav. To se postiže korištenjem sustava grijanja rasplinjača lociranog ispred ulaza u rasplinjač i potencijalno opasnih zona zaleđivanja poput koljena usisne cijevi. Topli zrak opskrbljuje se kroz kontrolni ventil koji se otvara u usisnom sustavu te propušta topli zrak iz unutrašnjosti motora. Nepravilna ili nepažljiva upotreba grijanja rasplinjača može biti jednako opasna kao i najrazvijeniji stupanj zaleđivanja. Povećanjem temperatura povećava se i volumen zraka te se smanjuje njegova gustoća. Time se reducira težina zraka dovedena u cilindar i uzrokuje značajan gubitak snage zbog smanjene volumenske učinkovitosti. Također veliki protok toplog zraka može uzrokovati detonacijska izgaranja i kvarove na motoru, pogotovo tijekom faze polijetanja i operacija gdje je potrebna velika snaga. Stoga se grijanje rasplinjača koristi prema potrebama proizašlim iz eksploatacije zrakoplova, te ga nije dobro držati upaljenim tijekom cijelog leta.

Kada postoji opasnost od zaleđivanja usisnog sustava, pilot kontrolom iz kokpita, ručicu grijanja rasplinjača treba postaviti u poziciju HOT. Led na zaklopki ili bilo koja druga vrsta leda koji sprječava protok goriva ili smanjuje njegov protok može najbrže biti uklonjen koristeći FULL CARBURATOR HEAT. Ako je toplina motora dovoljna, nema potrebe za paljenjem grijanja rasplinjača tijekom normalnog režima leta.

Prva indikacija da je došlo do zaleđivanja rasplinjača u zrakoplovu sa fiksnim korakom elise je pad u okretajima motora koji mogu biti popraćeni grubim radom motora. U zrakoplovima sa propelerom konstantne brzine vrtnje, odnosno promjenjivog koraka (*Constant Speed Propeller*) zaleđivanje rasplinjača može biti indicirano padom tlaka u usisnom sustavu, ali ne i u padu okretaja. Iako se zaleđivanje rasplinjača može dogoditi tijekom svih faza leta osobito je opasno prilikom smanjivanja snage tijekom spuštanja, te je u toj fazi leta potrebno posvetiti veću pozornost na indikacije koje bi mogle ukazati na zaleđivanje.

#### 3.1. Zaleđivanje nastalo isparivanjem goriva.

Slika 18 prikazuje dvije vrste zaleđivanja koje nastaju unutar usisnog sustava, i to led koji nastaje isparivanjem goriva i led oko zaklopke.



**Slika 18: Led u usisnoj grani**

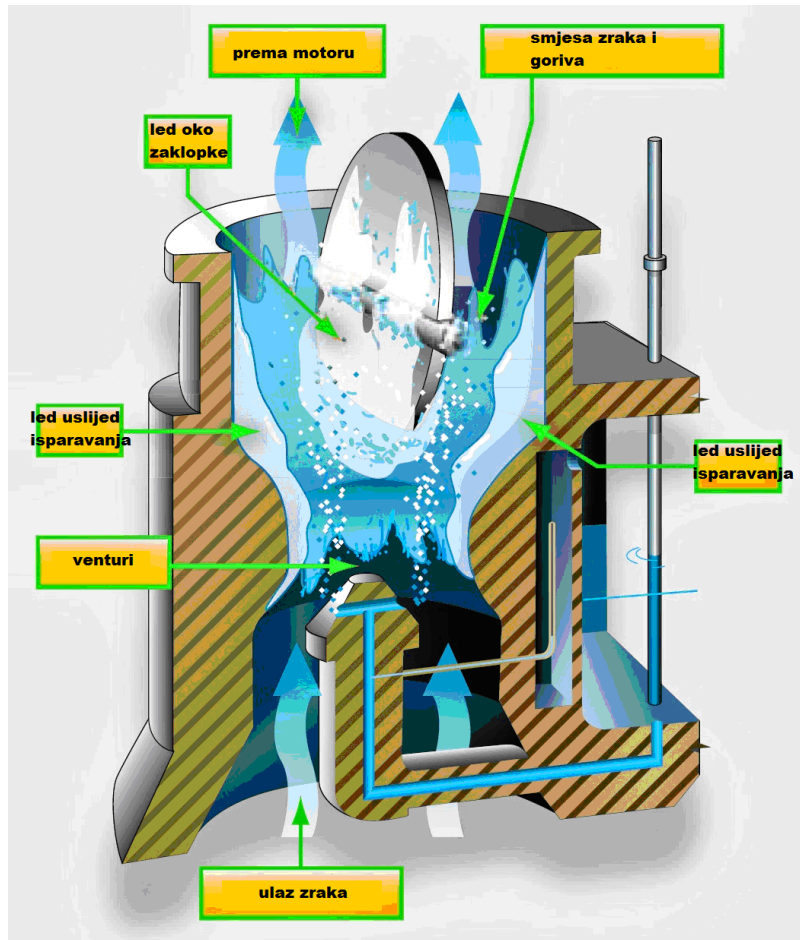
Izvor: <http://www.skybrary.aero/bookshelf/books/2381.pdf>

Zaleđivanje nastalo isparivanjem goriva (*Fuel Evaporation Ice*) formira se zbog niske temperature zraka koja je rezultat isparivanja goriva nakon što je ono pušteno u struju zraka. Kako gorivo isparava, temperatura se snižava u području gdje isparavanje nastaje. Mala količina vlage u zraku može dovesti do zaleđivanja na tom području. Često je slučaj da taj tip zaleđivanja pogađa sustave u kojima se gorivo ubrizgava u struju zraka unutar rasplinjača, poput tipova rasplinjača s plovkom. Rjeđe se događa u sustavima u kojima je gorivo ubrizgava nizstrujno od rasplinjača. Ovaj tip zaleđivanja rasplinjača može se dogoditi i pri temperaturama zraka visokim čak i do 30°C u velikom spektru atmosferske vlage, čak i kada je vlažnost zraka na samo 50 %. Generalno gledano led nastao zbog isparivanja goriva ima tendenciju akumuliranja na brizgaljki goriva unutar rasplinjača. Ovaj tip leda smanjuje tlak u usisu te smeta protoku goriva i utječe na distribuciju smjese [4], [5]. Motor s direktnim ubrizgavanjem ima prednost nad motorom s rasplinjačem upravo iz razloga što se ova vrsta leda ne može pojaviti u usisnoj grani tog tipa jer nema rasplinjač.

### 3.2. Zaleđivanje zaklopke gasa

Druga vrsta zaleđivanja je zaleđivanje zaklopke gasa (*Throttle Ice*). Zaleđivanje zaklopke gasa formira se na poleđini zaklopke, uobičajeno kada se zaklopka nalazi u djelomično zatvorenoj poziciji. Protok zraka kroz presjek rasplinjača i okolo zaklopke stvara nizak tlak na stražnjoj strani zaklopke što stvara razliku u tlakovima oko zaklopke koja ima efekt snažnog hlađenja smjese goriva i zraka. Vlaga se zadržava u tom području niskog tlaka i veže na sebe kristaliće leda na strani zaklopke s čije strane vlada područje niskog tlaka. Na taj način sve se više leda veže u uskom prolazu poluzatvorene zaklopke. To znači da već mala količina leda može prouzročiti relativno veliku redukciju u protoku zraka i smjese zraka i goriva. Ukoliko dođe do većih zaleđivanja, formirani led može zaglaviti zaklopku te u potpunosti ograničiti njeno kretanje što dovodi do situacije gdje je protok zraka i smjese zraka

i goriva u potpunosti onemogućen te će doći do otkaza motora [4] [5]. Slika 19 prikazuje presjek rasplinjača u kojem je došlo do zaleđivanja zaklopke gasa. Jasno je vidljivo kako se stvaranjem leda znatno smanjio presjek rasplinjača čime je smanjena mogućnost prolaska zraka.



**Slika 19: Vrste zaleđivanja rasplinjača**

Izvor: [http://4.bp.blogspot.com/-](http://4.bp.blogspot.com/-R6ARdhKVboo/UkcfqhB4M1I/AAAAAAAAAVo/ZCzTCwbJM7I/s1600/Ice+formation+on+carburetor.jpg)

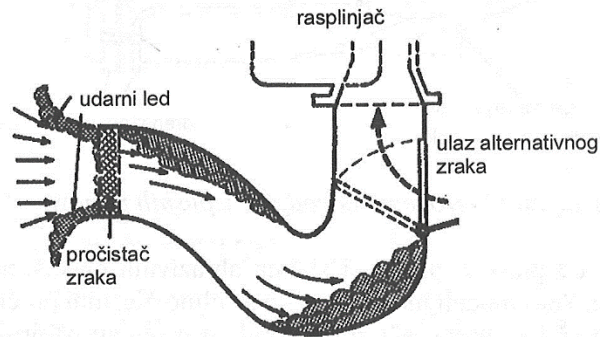
[R6ARdhKVboo/UkcfqhB4M1I/AAAAAAAAAVo/ZCzTCwbJM7I/s1600/Ice+formation+on+carburetor.jpg](http://4.bp.blogspot.com/-R6ARdhKVboo/UkcfqhB4M1I/AAAAAAAAAVo/ZCzTCwbJM7I/s1600/Ice+formation+on+carburetor.jpg)

### 3.3. Udarni led

Treća vrsta zaleđivanja je udarni led (*Impact Ice*). Udarni led se formira zbog velike količine vode u obliku snijega, bljuzge, kiše ili velike količine vlage. Ovaj oblik zaleđivanja najčešće nastaje pri temperaturama oko 0°C. Male količine zaleđene kiše, snijega ili bljuzge tijekom leta vrlo brzo na sebe mogu prikupiti još veću količinu leda. Zbog inercije nakupljeni led ima tendenciju nakupljanja na većoj površini zbog smjera kretanja zračne struje koja ga odnosi u pravcu suprotnom od smjera kretanja zrakoplova. Ovaj tip leda može nastati na koljenu prije rasplinjača kao i u usisnoj cijevi i ostalim elementima unutar nje. Najopasnije vrste zaleđivanja ovog tipa su zaleđivanje filtera zraka ispod elise na ulazu u usisni sustav ili



prije samog rasplinjača U slučaju zaleđivanja prije rasplinjača već male količine kristala mogu smanjiti protok zraka a time i snagu motora. Slika 20. prikazuje područje skupljanja ove vrste leda.



**Slika 20: Udarni led**  
Izvor [1]

Unatoč negativnim posljedicama ove vrste leda, u takvim uvjetima led može biti puno opasniji ako se nataloži na napadnim ivicama krila i repnim površinama. U specifičnim slučajevima zbog malog udjela vlage pri niskim temperaturama u usisnu granu može ući takozvani suhi led koji zbog malog udjela vlage ima mogućnost prolaska kroz cijeli usisni sustav te ulaska unutar rasplinjača. Ukoliko dođe do navedene situacije, može se stvoriti oblik udarnog leda unutar samog rasplinjača. [4] [5]. Slika 21 prikazuje zrakoplov tipa C182. Na slici je označeno područje potencijalno za stvaranje udarnog leda



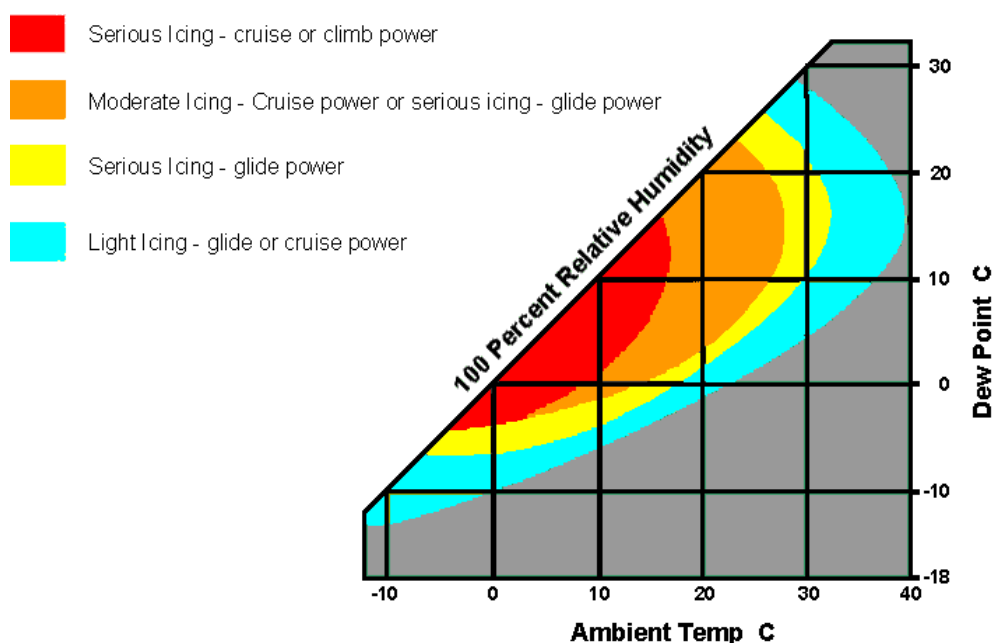
**Slika 20: Potencijalno područje za stvaranje udarnog leda**

Izvor: <https://disciplesofflight.com/wp-content/uploads/2016/01/B-Bar-C-167-Katmai-Cessna-182-Skylane.jpg>

## 4. UVJETI KOJI DOVODE DO ZALEĐIVANJA

Zaleđivanje usisnog sustava i rasplinjača može nastati u svim fazama i režimima leta. Nastaje u povoljnim i u nepovoljnim vremenskim uvjetima. To znači da do zaleđivanja može doći tijekom svih faza leta u svako godišnje doba. Pogotovo je opasno tijekom spuštanja ili kada je iz nekog drugog razloga mala postavka snage. Ako se generalno gleda, može se reći kako su najopasniji uvjeti za zaleđivanje usisnog sustava zrakoplova tijekom hladnih i vlažnih dana pri maloj postavci snage.

U sljedećem grafikonu vidi se ovisnost temperature i vlage zraka o režima leta u kojima se zaleđivanje može dogoditi. Također pokazuje ozbiljnost i količinu leda koji može nastati.



Slika 21: Prikaz ovisnosti temperature i vlage o zaleđivanju tijekom različitih režima leta

Izvor: <http://www.asiresource.com/carbice.gif>

### 4.1. Nepovoljni vremenski uvjeti za let

Čim se zrakoplov nalazi u uvjetima negativne vanjske temperature znači da postoji realna i velika mogućnost za zaleđivanje bez obzira nalazi li se u oblaku ili izvan njega. Oblaci su puni vodene pare te se stoga prolazak kroz oblake ne predlaže, a pogotovo ne za vrijeme hladnih dana pri niskim temperaturama. Prolazak kroz oblak nije preporučljiv za hladnih dana jer je zrak u njemu bogat vodenom parom. Oblak sadrži 100% vodene pare, te se ona može u kombinaciji s niskim temperaturama uhvatiti u usisnom sustavu zrakoplova i početi stvarati i nagomilavati led [6]. Prilikom leta u takvim uvjetima piloti su svjesni rizika koji snose te stoga imaju u vidu moguće nagomilavanje leda. Mnogo opasniji su uvjeti ako u zraku nema jasno vidljivih vodenih kapljica. Ulaskom u područje negativnih temperatura

zraka kapljice se u sudaru sa čvrstom površinom pretvaraju u led. Prilikom leta veće pothlađivanje može se očekivati u oblacima ulaznih gibanja tipa kumululus, kumulonimbus i stratokumululus, a manje u altokumululusima i nimbostratusima. Jedno od najopasnijih uvjeta letenja, iz razloga što nije lako uočljivo, je letenje u vlažnom vedrom zraku, to jest kada se leti iz hladnijeg u toplije područje. Slika 23 prikazuje oblak tipa kumulus kroz koji nije preporučljivo letjeti zbog niske temperature i velikog udjela vlage. Prolaskom kroz taj tip oblaka riskira se zaleđivanje usisnog sustava.



**Slika 22: Tip oblaka kroz koji nije preporučljivo prolaziti**

Izvor: <https://userscontent2.emaze.com/images/aa859f71-6afe-4ae5-a65b-e4a51a711620/6d7ead99-5040-4b87-b9fc-5d9d111537a5.jpg>

Iako vremenski uvjeti ne moraju biti nepovoljni kako bi temperatura bila niska, ovdje je navedena kao negativan čimbenik koji pospješuje mogućnost zaleđivanja rasplinjača. Kako bi se spriječila ta mogućnost važno je pratiti vanjsku temperaturu pogotovo tijekom leta na višim visinama. U pravilu grijanje rasplinjača se pali kada vanjska temperatura dosegne 5°C [7].

## **4.2. Povoljni vremenski uvjeti za let**

Zaleđivanje rasplinjača ne nastaje samo u negativnim atmosferskim uvjetima već do njega može doći i prilikom vedrog vremena. Iako u zraku može biti i do 30 °C led se u rasplinjaču može stvoriti zbog pada statičkog tlaka. To se dešava u uvjetima spuštanja, slijetanja ili generalno oduzimanja snage. U tom je trenutku poluga zaklopke u gotovo pritvorenom položaju što povećava brzinu strujanja, a zbog povećanja brzine strujanja padaju tlak i temperatura lokalno u rasplinjaču. Taj pad temperature može biti značajan iako je visoka

vanjska temperatura. U kombinaciji s padom temperature u stvaranju leda potpomaže isparivanje goriva ili vlaga u zraku. Stoga je uvijek prilikom potpunog oduzimanja gasa potrebno upaliti grijanje rasplinjača kako ne bi došlo do neželjenog zaleđivanja [7]. Slika 24 prikazuje naizgled savršene vremenske uvjete za vizualno letenje, ali i u takvim uvjetima, pogotovo u fazi spuštanja i prilaska za slijetanje, može doći do pojave zaleđivanja. Iz tog je razloga neovisno o vremenskim uvjetima vrlo bitno paliti grijanje rasplinjača u fazama leta osjetljivim na zaleđivanje.



**Slika 23: Potencijalna situacija za zaleđivanje pri slijetanju**  
Izvor: <https://i.ytimg.com/vi/6EEiOw5WgWM/maxresdefault.jpg>

Kako bi se smanjila mogućnost zaleđivanja rasplinjača neovisno leti li se u povoljnim ili nepovoljnim uvjetima, važno je paliti grijanje ne samo u fazama slijetanja već u bilo kojim situacijama u kojima smanjujemo snagu poput: prevlačenja, sporog leta ili sličnih manevara koji zahtjevaju malu postavku snage [7].

## 5. ISKUSTVA IZ EKSPLOATACIJE

Od naučenoga znanja jedina bitnija stvar u zrakoplovstvu je iskustvo. Iskustvo je bitno kako se pogreške počinjene u prošlosti ne bi ponovile. Još više daju uvid u moguće tehničke probleme koje se trebaju ispraviti u cilju povećanja sigurnosti u zrakoplovstvu. Na taj način došlo je do mnogih unaprjeđenja sustava zrakoplova koji omogućavaju bezbrižniji let. Stoga se može reći kako je iskustvo ključno za daljnji razvoj. Instruktori i dugogodišnji piloti s naletom od nekoliko tisuća sati podijelili su svoja iskustva iz eksploatacije s obzirom na zaleđivanje usisnog sustava.

### 5.1. Zamrzavanje u školskom krugu

Pilot i nastavnik s dugogodišnjim letačkim iskustvom susreo se sa zaleđivanjem usisnog sustava zrakoplova tipa C172 N u skraćenom školskom krugu netom nakon polijetanja na Zagrebačkom glavnom aerodromu LDZA [7]. Nakon polijetanja, pilot je prepoznao kako je došlo do otkaza umjetnog horizonta. Nakon što je prepoznao kvar instrumenta zatražio je od nadležne kontrole zračnog prometa slijetanje na LDZA kako bi otkazao let. Nadležna kontrola odobrila mu je slijetanje postupkom skraćenog školskog kruga u stazu 05. Tijekom ulaska u final, zbog vrlo uskog školskog kruga, u potpunosti je prije praga piste oduzeo gas i sletio na samu točku dodira. S obzirom na kratki zaustavni put, bio je u mogućnosti napustiti uzletno-sletnu stazu već na voznoj stazi B. Tijekom izlaska sa uzletno-sletne staze motor se zaustavio, zbog zaleđivanja usisnog sustava. Nakon otprilike 2 minute pilot je bio ponovno u mogućnosti upaliti motor i taksirati do parkirne pozicije generalne avijacije. Tek je nakon slijetanja i zaustavljanja primijetio da zbog radnog opterećenja u vrlo kratkom vremenskom roku skraćenog školskog kruga nije upalio grijanje rasplinjača. U trenutku operacije temperatura okolnog zraka je bila oko 5°C, a vlaga zraka vrlo velika, oko 80%. Slučaj je završio bez ikakvih posljedica.

Razlog smrzavanja prvenstveno su niska temperatura i velika vlaga zraka koja već sami po sebi mogu stvoriti led na usisnom sustavu zrakoplova. Kada se tome doda potpuno oduzeti gas koji postavlja zaklopku rasplinjača u gotovo pritvorenu poziciju dolazi do pada statičkog tlaka u rasplinjaču koji u suradnji sa isparavanjem goriva, niskom temperaturom i velikom vlagom neminovno izazivaju stvaranje leda u usisnom sustavu.

### 5.2. Zamrzavanje tijekom izvođenja vježbe „*One engine inoperative*“

Tijekom školskog leta u kojem su se dva studenta trebala upoznati s uvjetima leta u dvomotornom zrakoplovu PA-44-180 pri otkazu jednog motora, došlo je do negativnog ishoda zbog zaleđivanja rasplinjača pri maloj snazi u uvjetima slijetanja, odnosno, došlo je do pada zrakoplova, na sreću, bez smrtnih posljedica. Nezgoda se dogodila na malom aerodromu Brustem airfield u Belgiji 11. rujna 2011. a u trenutku pada u zrakoplovu su se nalazila dva studenta i instruktor letenja [8].

Tijekom prilaza za slijetanje na povratku iz školskog kruga s jednim operativnim motorom, student je primijetio da nije u mogućnosti održati pravac piste, te u tom trenutku

instruktor preuzima kontrole i slijeće s avionom. Za vrijeme rulanja po uzletno sletnoj stazi (USS) instruktor je rekonfigurirao kontrolne površine zrakoplova (*trimer*) te započeo s ponovnim polijetanjem. Nakon odvajanja od površine USS-a avion je naglo zakrenuo u lijevu stranu te nakon par sekundi zbog male snage i nedovoljne brzine, izgubio uzgon i udario u tlo. Zrakoplov je letio u nepovoljnim vremenskim uvjetima, u uvjetima jakog zaleđivanja pri postavci snage „*descent power*“ te umjerenog zaleđivanja na postavci snage „*cruise power*“.

Kao zaključak istrage navedeno je kako posada nije na vrijeme primijetila kako je vježba otkaza lijevog motora dovela do nezgode, jer se upravo lijevi motor zamrznuo (Prema riječima instruktora „*Vježba otkaza lijevog motora je postala stvarnost*“ [8]). Zbog male snage na lijevom motoru u imitaciji otkaza, prilikom spuštanja u uvjetima zaleđivanja, došlo je do zaleđivanja zaklopke rasplinjača. Nakon radnog opterećenja instruktora, odnosno, 5 sati leta s drugim studentima, instruktor je zaboravio prilikom spuštanja upaliti grijanje rasplinjača, te prilikom ponovnog polijetanja lijevi motor nije mogao dobiti potrebnu snagu. Kako zrakoplov nije bio opremljen instrumentom za očitavanje temperature rasplinjača (CAT) ništa im nije dalo naslutiti kako je došlo do zamrzavanja.

Iz ovog slučaja može se uvidjeti opasnost u koju zaleđivanje može dovesti iako je višemotorni zrakoplov. Također vrlo je bitno napomenuti da je jedan od faktora koji je pridonio razvoju ovakve situacije i to što je instruktor prije ovog leta imao 5 sati instruiranja, te da su njegova odsutnost i umor vrlo bitni čimbenici koji su potpomogli toj nezgodi [8]. Slika 25 prikazuje do kojih kobnih rezultata može dovesti zaleđivanje rasplinjača. Prikazan je zrakoplov tipa PA44 koji je doživio zaleđivanje rasplinjača kojem nije pravilno pristupljeno što je u konačnici dovelo do pada.



**Slika 24: Posljedica stvaranja leda na usisu**

Izvor: <http://www.jouwkeuken.nl/images/oo-tms-piper-seminole-zeeland.jpg>

### 5.3. Zamrzavanje tijekom IFR ispitnog leta

Tijekom IFR ispitnog leta u instrumentalnim uvjetima letenja, pilot s preko 1200 sati naleta susreo se s zamrzavanjem rasplinjača u školskom krugu [9]. Tijekom leta na zrakoplovu PA28 na visini od 5000 ft pilot je primjetio kako zrakoplov ima manjka snage i da mu je teško održavati zadanu visinu. Za vrijeme dok je pilot uključio grijanje rasplinjača i motor se vratio u normalan režim rada, zrakoplov je propao na 4600 ft. Kontrola zračne plovidbe Teksaskog aerodroma je zadala pilotu da se pripremi za ILS prilaz za stazu 10 i promijeni frekvenciju, no pilot se u tom trenutku borio kako bi održao kontrolu nad avionom te nije odgovorio kontroloru niti promijenio frekvenciju. Pilot vjeruje da je zbog navedenih problema u komunikaciji došlo do preusmjerenja drugih zrakoplova koji su također bili na prilazu za aerodrom. IFR let je sam po sebi dovoljno zahtjevan i kada se ne leti u instrumentalnim uvjetima, te je veliko radno opterećenje pilota dovelo do sporijih reakcija pilota koje su dovele njega i ostali promet u potencijanu opasnost.

### 5.4. Tragični ishod zamrzavanja rasplinjača

Tijekom leta u veljači 2012. godine u saveznoj državi Texas zrakoplov generalne avijacije Varga Aircraft Corp. srušio se nedaleko od aerodroma slijetanja [10]. Nakon gubitka komunikacije i radarskog kontakta, pokrenuta je potraga te je zrakoplov nađen u jezeru nadomak aerodroma, slika 26.



Slika 25: Tragični slučaj pada uzrokovanog zaleđivanjem rasplinjača

Izvor: [http://3.bp.blogspot.com/-](http://3.bp.blogspot.com/-d1yMTEZvPe8/TzWl_kxYjqI/AAAAAAAAAGWM/71StGOvNjQc/s1600/plane_pullout.jpg)

[d1yMTEZvPe8/TzWl\\_kxYjqI/AAAAAAAAAGWM/71StGOvNjQc/s1600/plane\\_pullout.jpg](http://3.bp.blogspot.com/-d1yMTEZvPe8/TzWl_kxYjqI/AAAAAAAAAGWM/71StGOvNjQc/s1600/plane_pullout.jpg)

Zrakoplov je nađen s otvorenom kabinom te odvezanim sigurnosnim vezama. Ventil goriva i prekidač pokretača motora su oboje bili isključeni, kao i prekidači akumulatora i avionike. Ručica snage je bila postavljena u poziciji najveće snage, a ručica smjese u poziciji bogate smjese. Istražitelji su primjetili kako je ručica grijača rasplinjača također bila isključena. Daljnjom istragom istražitelji su ustvrdili kako je tijekom leta vrijeme bilo povoljno uz slabi vjetar, no temperatura okolnog zraka i točka rosišta niske i vrlo blizu. Zrakoplov je letio u uvjetima povoljnim za zaleđivanje rasplinjača pri postavci snage za režim krstarenja, te se smrzavanje navodi kao glavni razlog pada zrakoplova. Vjerojatno je da se pilot nije snašao ili nije prepoznao kako je došlo do zamrzavanja te nije adekvatno postupio, već se odlučio na prislino slijetanje u jezero. Mrtvozornik je ustvrdio kako je pilot preminuo od gušenja koje je naslijedilo nakon hipotermije.



## 6. ZAKLJUČAK

U ovom radu analizirani su uvjeti zaleđivanja rasplinjača zrakoplovnog klipnog motora tijekom eksploatacije. Analiza daje uvid kako dolazi do zaleđivanja, gdje se javlja i kako se manifestira ukoliko dođe do njega. Također, detaljnom analizom pojedinih slučajeva u kojima je došlo do nekih vrsta zaleđivanja pomaže se u razvitku novih tehnologija, metoda ali i podiže svijest o zaleđivanju i do kojih posljedica može doći ukoliko se zanemaruje mogućnost zaleđivanja. Vrlo je bitno ovom sveprisutnom problemu pristupiti ozbiljno kako bi se izbjegle nezgode ili neželjene situacije tijekom leta. Stoga se već od prvih upoznavanja budućih pilota sa zrakoplovima pažnja skreće prema problemu zaleđivanja. Instruktori letenja primjerima i iskustvom prenose znanje na mlade pilote o postupcima sprječavanja zaleđivanja ali i postupcima koje trebaju poduzeti ukoliko dođe do zaleđivanja. Ukoliko dođe do zaleđivanja bitno je ostati smiren i postupiti prema procedurama o zaleđivanju kako ne bi došlo do nezgode. Iskustvo govori kako je za efikasno sprječavanje i rješavanje zaleđivanja bitno znanje o načinu funkcioniranja pojedinih elemenata podložnih zaleđivanju, ali i ozbiljnost u prepoznavanju prvih znakova zaleđivanja kako bi se pravovremeno moglo reagirati.

## LITERATURA

- [1] Bazijanac, E.: Zrakoplovni klipni motori, Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2005.
- [2] "Hrvatska enciklopedija", Leksikografski zavod Miroslav Krleža, www.enciklopedija.hr, lipanj 2016
- [3] <http://www.flyrotax.com/services/technical-documentation.html>
- [4] [http://www.faa.gov/documentlibrary/media/advisory\\_circular/ac\\_65-12a.pdf](http://www.faa.gov/documentlibrary/media/advisory_circular/ac_65-12a.pdf)
- [5] [https://www.faa.gov/regulations\\_policies/handbooks\\_manuals/aircraft/media/FAA-H-8083-32-AMT-Powerplant-Vol-1.pdf](https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aircraft/media/FAA-H-8083-32-AMT-Powerplant-Vol-1.pdf)
- [6] <https://www.ecos-psa.hr/meteorologija-2/>
- [7] Iskustva instruktora letenja tijekom školovanja, Fakultet prometnih znanosti, HZNS, travanj 2015.
- [8] <http://mobilit.belgium.be/sites/default/files/downloads/AA-11-19.pdf>, srpanj 2016.
- [9] <http://www.37000feet.com/report/366666/PA28A-aircraft-on-instrument-flight-check-for-reporter-pilot-incurred-carburetor-icing>, kolovoz 2016.
- [10] <http://www.kathrynsreport.com/2012/02/no-body-found-in-plane-officials-still.html>, kolovoz, 2016.

## POPIS SLIKA

Slika 1: Sustavi usisa i ispuha zraka.....	2
Slika 2: Prikaz ulaza glavnog i alternativnog zraka .....	3
Slika 3: Pročistač zraka za C172 .....	4
Slika 4: Pogled na pročistač usisnog sustava DV20.....	5
Slika 5: Pogled na dijelove usisnog i ispušnog sustava C172 .....	5
Slika 6: Usisni sustav motora na zrakoplovu C172.....	6
Slika 7: Rasplinjač.....	7
Slika 8: Rasplinjači i dovod goriva za motor 912S .....	8
Slika 9: Ispušni sustav C172 .....	9
Slika 10: Ispušni sustav DV20 .....	10
Slika 11: Sustav grijanja kabine .....	11
Slika 12: Ispušni sustav malog zrakoplova .....	11
Slika 13: Detektor ugljikovog monoksida (popularno poznat kao „žuta tableta“).....	12
Slika 14: Sustav grijanja rasplinjača.....	13
Slika 15: Ručica grijanja rasplinjača na zrakoplovu C172.....	14
Slika 16: Ručica grijanja rasplinjača na zrakoplovu DV20.....	14
Slika 17: Instrument CAT na zrakoplovu C172 .....	15
Slika 18: Led u usisnoj grani .....	17
Slika 19: Vrste zaleđivanja rasplinjača.....	18
Slika 21: Potencijalno područje za stvaranje udarnog leda .....	19
Slika 22: Prikaz ovisnosti temperature i vlage o zaleđivanju tijekom različitih režima leta .....	20
Slika 23: Tip oblaka kroz koji nije preporučljivo prolaziti .....	21
Slika 24: Potencijalna situacija za zaleđivanje pri slijetanju.....	22
Slika 25: Posljedica stvaranja leda na usisu .....	24
Slika 26: Tragični slučaj pada uzrokovanog zaleđivanjem rasplinjača .....	25

## METAPODACI

**Naslov rada:** Analiza uvjeta zaleđivanja rasplinjača zrakoplovnog motora prema podacima iz eksploatacije

**Student:** Natko Mišljenac, JMBAG 0066214738

**Mentor:** Doc. dr. sc. Anita Domitrović

**Naslov nadrugomjziku (engleski):** Analysis of the Carburetor Icing Condition due to Aircraft Operation

**Povjerenstvo za obranu:**

- Prof. dr. sc. Ernest Bazijanac, predsjednik
- Doc. dr. sc. Anita Domitrović, mentor
- v. pred. Izidor Alfirević, dipl.ing, član
- Izv. prof. dr. sc. Željko Marušić, zamjena

**Ustanova koja je dodijelila akademski stupanj:** Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu

**Zavod:** Zavod za aeronautiku

**Vrsta studija:** Preddiplomski

**Studij:** Aeronautika

**Datum obrane završnog rada:** 13. rujna 2016.

**Napomena:** pod datum obrane završnog rada navodi se prvi definirani datum roka obrane.

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj \_\_\_\_\_ završni rad

isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz

necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj

visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu

\_\_\_\_\_ završnog rada

pod naslovom **Analiza uvjeta zaleđivanja raasplinjača zrakoplovnog motora**

**prema podacima iz eksploatacije**

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

Student/ica:

U Zagrebu, 23.8.2016

\_\_\_\_\_  
(potpis)