

# Achates motor sa nasuprotnim klipovima

---

**Alić, Matko**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:142973>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-29**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**ACHATES MOTOR SA NASUPROTNIM KLIPOVIMA**

Rijeka, rujan 2022.

Matko Alić  
0069083874

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
**TEHNIČKI FAKULTET**

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**ACHATES MOTOR SA NASUPROTNIM KLIPOVIMA**

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Tomislav Senčić

Komentor: Doc. dr. sc. Ozren Bukovac

Rijeka, rujan 2022.

Matko Alić  
0069083874

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam sukladno članku 8. Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku preddiplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta u Rijeci, ja, Matko Alić samostalno izradio završni rad „Achates motor sa nasuprotnim klipovima“ prema Uputama za izradu i samoarhiviranje završnog/diplomskog rada pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Tomislava Senčića i doc. dr. sc. Ozrena Bukovca.

---

Matko Alić

0069083874



# SADRŽAJ

1. UVOD .....	3
2. POVIJEST MOTORA S NASUPTORNIM KLIPOVIMA .....	4
3. KARAKTERISTIKE MOTORA S NASUPROTNIM KLIPOVIMA.....	8
3.1. Dvotaktni dizelski motor .....	8
3.2. Razlike između klasičnih dizelskih motora s i motora s nasuprotnim klipovima .....	9
3.3. Achates motor s nasuprotnim klipovima.....	9
3.4. Ispiranje cilindra .....	10
3.5. Hlađenje cilindra.....	11
3.5.1. Rashladni plašt cijelom dužinom cilindra .....	12
3.5.2. Rashladni plašt cijelom dužinom sa sudarnim mlazom na sredini cilindra .....	14
3.5.3. Skraćeni rashladni plašt sa sudarnim mlazom na sredini cilindra.....	15
3.5.4. Skraćeni rashladni plašt s proreznim sudarnim mlazom na sredini cilindra .....	17
4. TERMODINAMIČKI PRORAČUN .....	19
4.1. Poznata svojstva motora .....	19
4.2. Određivanje stanja u krajnjim točkama Sabatheovog procesa .....	20
4.2.1. Točka 1 – kraj usisa.....	21
4.2.2. Točka 2 – početak izgaranja.....	21
4.2.3. Točka 3 – početak ekspanzije.....	22
4.2.4. Točka 3' – kraj izgaranja.....	22
4.2.5. Točka 4 – kraj ekspanzije.....	23
4.3. Određivanje kompresijskog omjera $\epsilon$ .....	23
4.4. Određivanje termodinamičkog stupnja djelovanja Sabatheov-og procesa.....	24
4.5. Određivanje mase goriva u procesu.....	24
4.6. Određivanje masene potrošnje.....	25
4.7. Određivanje toplinskog toka.....	25
4.8. Određivanje masenog protoka zraka .....	25
4.9. Određivanje efektivnog stupnja djelovanja .....	26

4.10.	Određivanje efektivne snage.....	26
4.11.	Određivanje efektivnog rada.....	26
4.12.	Određivanje specifične potrošnje goriva .....	27
4.13.	Određivanje kutne brzine .....	27
4.14.	Okretni moment .....	27
4.15.	Određivanje srednjeg efektivnog tlaka .....	28
4.16.	Određivanje toplinskog toka predanog rashladnoj vodi .....	28
4.17.	Određivanje toplinskog toka odvedenog ispušnim plinovima.....	28
4.18.	Određivanje toplinskog toka predanog zraku za izgaranje nakon prednabijanja .....	29
4.19.	Određivanje toplinskog toka predanog s motora izravno na okolni zrak .....	29
5.	ZAKLJUČAK .....	31
	LITERATURA.....	32
	POPIS SLIKA .....	33
	SAŽETAK.....	34
	ABSTRACT .....	35

## 1. UVOD

Dizelski motor je izmislio Rudolf Diesel u vrijeme industrijske revolucije. U to vrijeme većina značajnijih izuma je bila usredotočena na korištenje parnih strojeva koji su koristili puno ugljena, bili veoma skupi i imali vrlo nisku iskoristivost te su zato bili dostupni samo velikim tvrtkama dok si manja poduzeća to nisu mogla priuštiti. Nakon nekoliko prototipa Diesel je 1897. uspio usavršiti motor koji je ostvario korisnost od 26,2% što je bila za 16,2% veća korisnost od parnih strojeva. Daljnjim razvojem motora njegova primjena postajala je sve veća, počeo se prvenstveno koristiti za pogon brodova i podmornica, a 1908. se dizelski motor prvi put ugrađuje u kamion. 1925. Švicarski inženjer Alfred Büchi je kombinacijom dizelskog motora i svoje tehnologije prednabijanja uspio povisiti iskoristivost na više od 40% te većina modernih dizelskih motora koriste Büchijeve principe.

Dizelski motori danas pogone svjetsko gospodarstvo te su prvi izbor motora za sva teretna vozila i plovila poput teretnih kamiona, lokomotiva, brodova, poljoprivrednih i građevinskih strojeva, a ugrađuju se i u veliki broj automobila. Preferirani su nad drugim vrstama motora zbog svojih mnogih prednosti poput visoke iskoristivosti, koja je veća nego kod bilo koje druge vrste motora s unutarnjim izgaranjem. Proizvode veći okretni moment od benzinskih motora pogotovo pri niskim brzinama vrtnje što je iznimno važno kod teretnih vozila. Mogu sagoriti raznolika goriva uključujući neka koja imaju razne prednosti nad benzinom poput dobrih svojstava podmazivanja, veće energetske gustoće, niske mogućnosti zapaljenja jer ne stvaraju zapaljivu paru te mogu raditi i na biodizel. Ispušne emisije dizelskih motora su vrlo dobre te sadržavaju minimalne količine ugljikovog monoksida i ugljikovodika. Zbog manjka visokonaponskog električnog sustava i karakteristike dizelskog goriva da dobro podmazuje ovi motori su uglavnom izuzetno pouzdani i vrlo izdržljivi.

Unatoč brojnim prednostima dizelski motori imaju i svoje mane. Primjerice, iako njihovi ispušni plinovi sadrže manje količine ugljikovog monoksida i ugljikovodika, ujedno sadrže i opasni dušikov oksid, čađu i crni dim na kojeg se vežu kancerogene čestice te su zbog toga kroz povijest dobili neželjeni epitet motora koji najviše onečišćuje zrak i okoliš te negativno utječu na zdravlje ljudi. Također su vrlo bučni uz veliku prisutnost vibracija pri radu. Zbog konstantne potražnje za efikasnijim i čistim dizelskim motorima firma Achatas razvila je inovativan dizelski motor, motor s nasuprotnim klipovima koji je tema ovog rada.



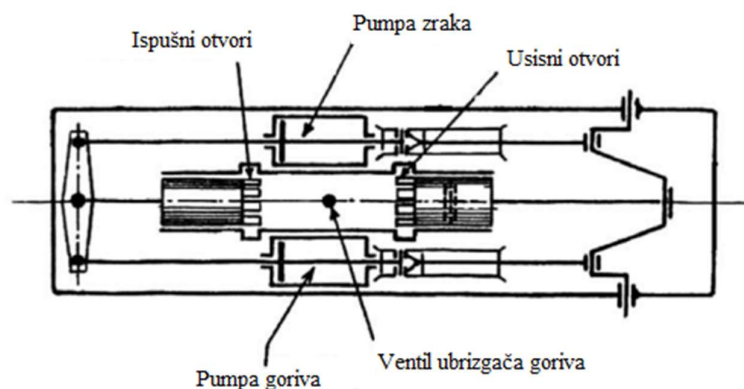
## 2. POVIJEST MOTORA S NASUPROTNIM KLIPOVIMA

Nijemac Friedrich Gilles je 1874. godine napravio motor s nasuprotnim klipovima kod kojeg je jedan klip bio povezan na koljenasto vratilo dok je drugi bio slobodan. Slobodni klip bi nakon zapaljenja smjese bio pomaknut do vrha cilindra gdje bi ga zadržalo kvačilo, što bi smanjilo pritisak unutar cilindra te uzrokovalo povratak povezanog klipa. Značajan broj ovih motora je proizveden no nisu bili uspješni jer nisu bili efikasni niti su se mogli mjeriti s Ottovim četverotaktnim motorima.

Wilhelm Wittig je proizveo vrlo vjerojatno prvi motor s nasuprotnim klipovima u kojem su oba klipa pogonila koljenasto vratilo. Donji klip je bio povezan direktno na vratilo, dok je gornji klip bio povezan pomoću dugih spojnih šipki. Velika prednost ove izvedbe je bila poništenje sila koje djeluju na ležajeve jer su klipovi stvarali jednake sile, ali u suprotnim smjerovima.

T.H. Lucas prvi je upotrijebio dva koljenasta vratila u motoru s nasuprotnim klipovima. Gornje vratilo imalo je veliki zamašnjak, dok je donje vratilo imalo zupčanike pomoću kojih je kontrolirano pravilno kretanje klipova.

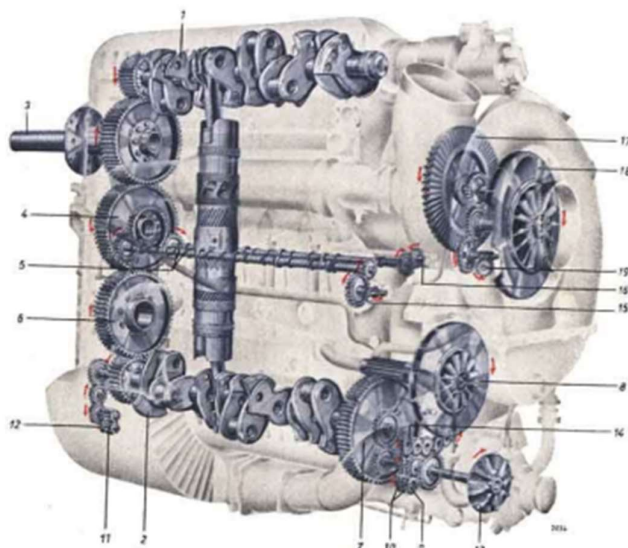
U listopadu 1888. godine Hugo Junkers se pridružio kompaniji Wilhelma Oechelhaeusera zvanog Deutsche Continental-Gas-Gesellschaft sa sjedištem u Njemačkom gradu Dessau, gdje je kasnije postao i partner. 1892. godine Junkers i Oechelhaeuser su proizveli revolucionaran dvotaktni motor s nasuprotnim klipovima (slika 2.1), imao je jedno koljenasto vratilo slično kao kod ranije spomenutog Wittigovog motora, no u njihovoj izvedbi jedna spojna šipka prolazi kroz pumpu goriva, dok spojna šipka s druge strane cilindra prolazi kroz zračnu pumpu. Ovaj motor zapremnine otprilike 31 litre proizvodio je 84.3 kW izlazne snage uz srednji efektivni tlak od okvirno 13 bara te je imao mehanički stupanj djelovanja od 77% što je bilo i još uvijek je vrlo impresivno. Imao je potrošnju goriva 40% nižu od četverotaktnih motora tog doba.



Slika 2.1 Motor Oechelhaeusera i Junkersa [1]

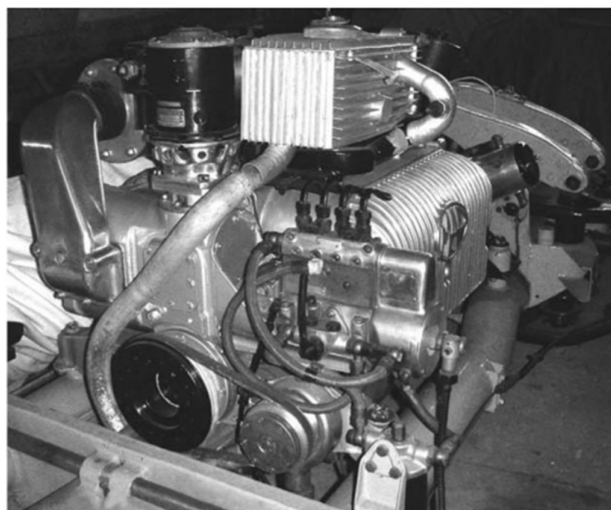
Period prije 1900. godine se najbolje može opisati kao period istraživanja za motore s nasuprotnim klipovima koji je donio mnoge ključne značajke modernih motora s nasuprotnim klipovima. Nakon 1900. godine dizelski motori s nasuprotnim klipovima su se počeli primjenjivati u vozilima, plovilima i zrakoplovima. U nastavku će biti prikazani te opisani neki od poznatijih motora s nasuprotnim klipovima kroz povijest.

Junkers Jumo 205 (slika 2.2) je najpoznatiji motor iz serije dizelskih zrakoplovnih motora, koji su prvi i preko pola stoljeća jedini uspješni zrakoplovni dizelski motori. Svi motori u Jumo seriji su koristili dvotaktni ciklus s 6 cilindara i 12 klipova te 2 koljenasta vratila povezana zupčanicima, ali su se razlikovali po promjeru i hodu klipova. Ugrađivani su u nekoliko različitih aviona s različitim primjenama koje je koristilo njemačko zrakoplovstvo u periodu od 1930. do 1945. godine.



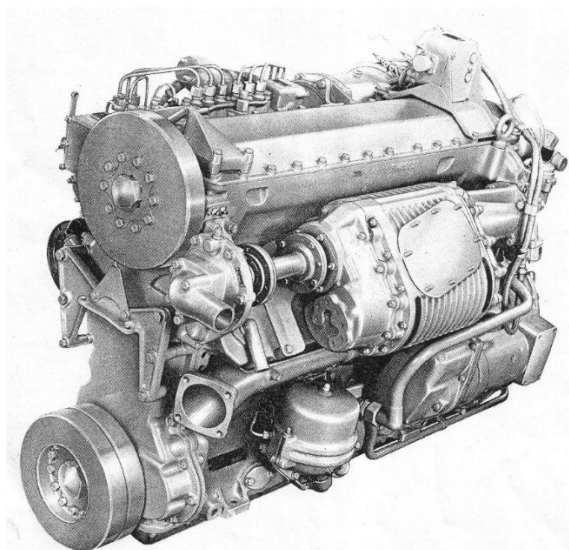
*Slika 2.2 Prikaz Junkers Jumo 207 zrakoplovnog motora [1]*

Manufacture d'Armes de Paris (MAP), što bi u prijevodu značilo tvornica oružja Pariz, je tvornica koja je nakon rata 1947. godine počela proizvoditi dizelske motore s nasuprotnim klipovima za primjenu u automobilima, traktorima te plovilima. Unatoč tome što MAP nije imao znatni uspjeh na tržištu, motor (slika 2.3) je postao poznat po svojim uspjesima u obaranju rekorda. Naime ovaj motor ugrađen u auto tvrtke Delahaye oborio je rekorde brzine na 50 km, 50 milja te 100 km i 100 milja, kada je ostvario brzine od 178 i 179 km/h te 179,79 i 182 km/h. Auto je nastupio i na poznatoj trci izdržljivosti Le Mans 24h 1952. godine no nije uspio završiti trku, te je umirovljen nakon 6 sati.



*Slika 2.3 MAP motor ugrađen u auto za utrku Le Mans 24h [1]*

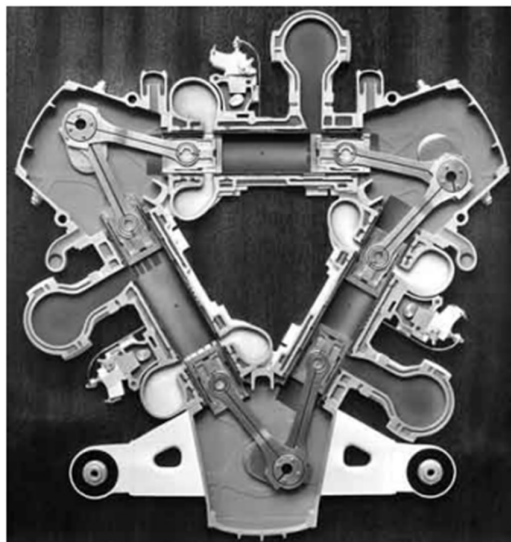
Rolls-Royce K60 (slika 2.4) je motor s nasuprotnim klipovima razvijen za vojne potrebe 1955. godine, uglavnom za tenkove. Ovaj motor imao je 6 cilindara, 240 konjskih snaga te je bio izuzetno povoljan za vojne potrebe zbog male težine te mogućnosti da radi na više vrsta goriva uz dizel, može raditi i na kerozin, gorivo za mlazne motore te benzin s oktanskim brojem manjim od 80. Ovaj motor se može pronaći u pogonu i u današnje vrijeme.



*Slika 2.4 Rolls-Royce k60 motor [1]*

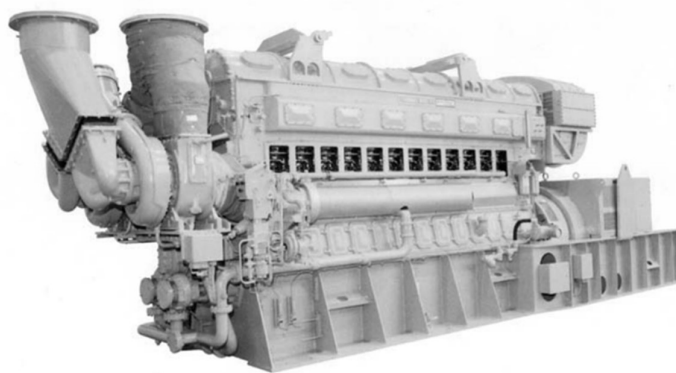
Tvrtka D. Napier & Son je za primjenu u plovilima razvila vrlo neobičan motor (slika 2.5). Cilindri ovog motora postavljeni su u obliku trokuta, a na svakom kutu trokuta kojeg tvore cilindri postavljeno je koljenasto vratilo. Zbog oblika koji nalikuje na slovo delta grčkog alfabeta, ovaj

motor se naziva Napier Deltic. Razvoj ovog motora je započeo 1947. godine, a prvi model je proizveden 1950. Kako bi testirali ovaj motor Britanci su za usporedbu uzeli Mercedes-Benzov dizelski motor, slične snage, koji je pogonio uhvaćeni njemački brzi brod. Nakon zamjene dva od tri originalna motora s Deltic motorima, jasno se moglo vidjeti koliko je ovaj motor kompaktan budući da su zauzimali upola manje prostora te otprilike jednu petinu mase. Zbog svoje male težine korišteni su u patrolnim plovilima, te su upotrjebljivani i u nekoliko lokomotiva.



*Slika 2.5 Prikaz presjeka Napier Deltic motora [1]*

Motor tvrtke Fairbanks Morse  $38D8\frac{1}{8}$  (slika 2.6) izvorno je kreiran kako bi pogonio američke podmornice u vrijeme prije drugog svjetskog rata, te je zbog početka rata ugrađen u mnoge teretne brodove koji su hitno rađeni kako bi nadomjestili brodove koji su potonuli u početku rata. Sada se koriste u manjim teretnim brodovima, kao pomoćni generatori te kao pomoćni pogon u američkim nuklearnim podmornicama. Osnovni dizajn motora ostao je nepromijenjen od 1934. godine.

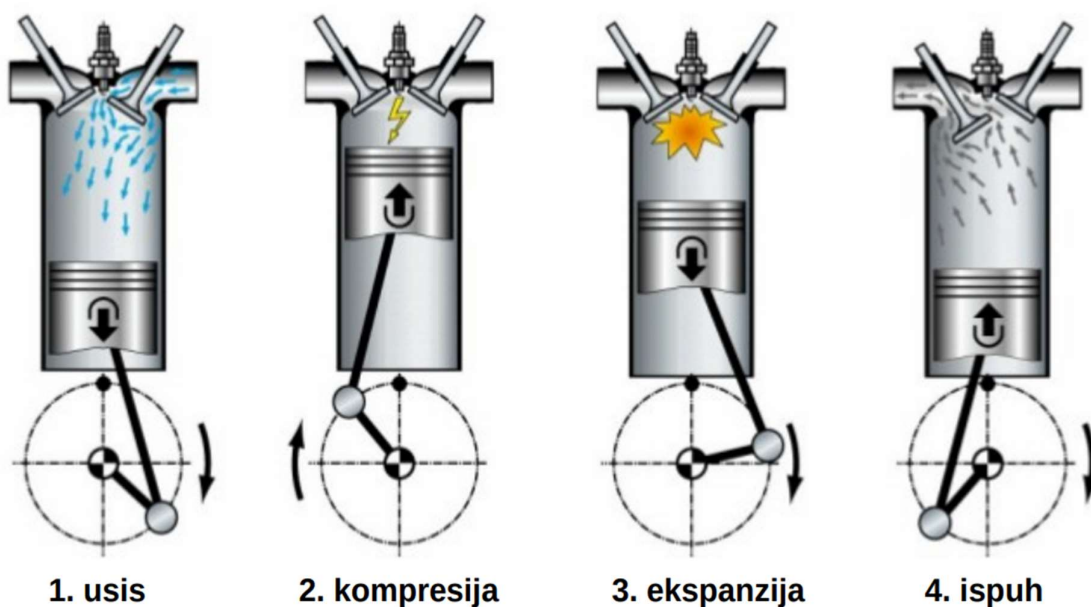


*Slika 2.6 Fairbanks Morse  $38D8\frac{1}{8}$  [1]*

### 3. KARAKTERISTIKE MOTORA S NASUPROTNIM KLIPOVIMA

#### 3.1. Dvotaktni dizelski motor

Motori s nasuprotnim klipovima su najbolje izvedeni kao dvotaktni motori, što znači da svoj radni ciklus završe u jednom punom okretaju koljenastog vratila odnosno okretu od  $360^\circ$ , za razliku od četverotaktnih motora kojima je za jedan ciklus potrebno dva puna okretaja odnosno okret od  $720^\circ$  (slika 3.1). Kod četverotaktnih motora svaki dio procesa, to jest usis, kompresija, ekspanzija i ispuh, zahtjeva poseban takt dok se pri radu dvotaktnih motora usis ispušnih plinova i usis svježeg zraka događaju istovremeno. Dvotaktni motori imaju mnogo prednosti nad četverotaktnim motorima, prvenstveno su lakši, efikasniji i jednostavniji no njihova uporaba je uglavnom izbjegavana od sedamdesetih godina prošlog stoljeća zbog problema koje tehnologija tog vremena nije mogla razriješiti. Dvotaktni motori tog doba trošili su više ulja nego četverotaktni motori jer se ulje gubilo kroz otvore u cilindru za usis i ispuh, a ulje prije 2000. godine je sadržavalo aditive koji su začepljivali katalizatore zbog velike količine pepela koja bi preostala. Još jedan problem koji se pojavljivao je bio ubrizgavanje goriva u dvotaktne motore s nasuprotnim klipovima zbog manjka cilindarske glave, što je značilo da injektori moraju biti ugrađeni u košuljicu cilindra. Injektori tog doba su koristili niske pritiske te je bilo teško postići dobro miješanje goriva sa zrakom unutar cilindra što je dovodilo do lošijih ispušnih emisija.



Slika 3.1 Proces četverotaktnog motora [2]

### **3.2. Razlike između klasičnih dizelskih motora s i motora s nasuprotnim klipovima**

Kod klasičnih dizelskih motora unutar svakog cilindra se nalazi jedan klip. Klip se kreće od DMT prema GMT, gdje s cilindarskom glavom zatvara komoru izgaranja. Izmjena plina je izvedena pomoću ispušnih i usisnih ventila koji se naizmjenice otvaraju i zatvaraju. Za njihov rad potrebno je bregasto vratilo. Za razliku od klasičnih motora s unutarnjim izgaranjem motori s nasuprotnim klipovima imaju 2 klipa unutar jednog cilindra. Klipovi se kreću od svojih donjih mrtvih točaka jedan prema drugome k svojim gornjim mrtvim točkama gdje formiraju komoru izgaranja. Takvom izvedbom uklonjena je potreba za cilindarskom glavom što pojednostavljuje konstrukciju motora te povećava efikasnost zbog toplinskih gubitaka koji su povezani s cilindarskom glavom. Uz uklanjanje cilindarske glave, zbog činjenice da je motor s nasuprotnim klipovima dvotaktni motor, uklonjeno je bregasto vratilo i ventili što dodatno pojednostavljuje konstrukciju ovih motora. Umjesto ventila se nalaze otvori u cilindarskoj košuljici povezani na usisni odnosno ispušni razvod. Kod klasičnih dizelskih motora svi klipovi su povezani na jedno koljenasto vratilo, no kod motora s nasuprotnim klipovima to nije moguće te su zato potrebna dva koljenasta vratila međusobno povezanih pomoću zupčanika kako bi se postiglo pravilno poklapanje kretanja klipova.

### **3.3. Achates motor s nasuprotnim klipovima**

Tvrtku Achates osnovao je James Lemke kako bi uz pomoć napredaka u tehnologiji i modernih načina obrade razvio revolucionarni motor koji bi zadovoljavao sve norme o emisiji goriva uz prihvatljivu potrošnju ulja, postižući nižu potrošnju goriva od modernih četverotaktnih dizelskih motora. Motori tvrtke Achates inspirirani su motorom koji je ranije spomenut u ovome radu, a to je Junkers Jumo motor. Kao i kod Junkersovog motora, motor sadrži 2 koljenasta vratila koja se nalaze na suprotnim stranama cilindra, te je uklonjena potreba za ventilima i bregastim vratilo kao i cilindarskom glavom. Za prednabijanje zraka ovaj motor koristi uz turbopuhalo i sustav mehaničkog prednabijanja (eng. Supercharger). Svi motori tvrtke Achates imaju tri cilindra kako bi se smanjilo poklapanje procesa izmjene plinove u cilindrima te održao dovoljan maseni protok ispušnih plinova za pogon turbopuhala.



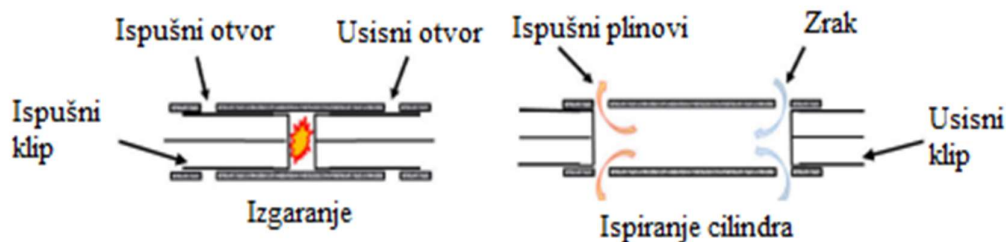
*Slika 3.2 Pojednostavljeni prikaz Achatesa motora s nasuprotnim klipovima [6]*

### **3.4. Ispiranje cilindra**

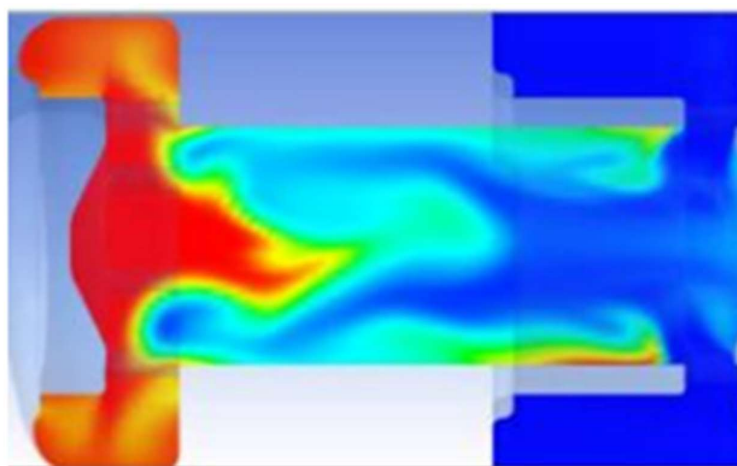
Proces izmjene plinova u cilindru kod dvotaktnih motora traje tri do četiri puta kraće nego kod četverotaktnih motora, a ima vrlo značajan utjecaj na kvalitetu cjelokupnog procesa koji se događa unutar motora. Pri ekspanziji u cilindru klipovi se gibaju prema svojim donjim mrtvim točkama (DMT), te gornji klip otkriva ispušne otvore prije nego donji otkrije usisne. Dio ispušnih plinova ističe iz cilindra i tlak u cilindru se smanjuje kako bi u trenutku otvaranja usisnih otvora tlak bio niži od tlaka zraka koji ulazi u cilindar. Tlak u ispušnoj cijevi mora biti niži od tlaka u cilindru, a tlak u cilindru mora biti niži od tlaka zraka koji ulazi u cilindar kako bi se postiglo ispiranje. U dvotaktnom motoru, postojati će ostatak ispušnih plinova u cilindru što je nepoželjno jer će taj ostatak smanjiti masu svježeg zraka te podići temperaturu plinova tokom sljedećeg ciklusa izgaranja što će povećati količinu dušikovih oksida (NO<sub>x</sub>) u ispušnim plinovima. Na ispiranje cilindra utječe izbor sustava prednabijanja, mehaničkog i prednabijanja turbopuhalom, dizajn usisnog i ispušnog razvodnika te veličina, lokacija i dizajn otvora na cilindarskoj košuljici za usis ispušnih plinova i usis svježeg zraka. Postoje tri vrste ispiranja kod dvotaktnih motora, poprečno, ispiranje u petlji te uzdužno. Uzdužno ispiranje je najefikasnije, ali kod klasičnih dvotaktnih motora zahtjeva upotrebu ventila što komplicira njihovu konstrukciju međutim firma Achat je



postigla uzdužno ispiranje u svojim motorima s nasuprotnim klipovima bez ventila pozicioniranjem otvora za usis i ispuh te oblikovanjem cilindara. Razvili su poseban oblik vrhova klipova koji komplementiraju jedan drugome te potiču vrtloženje smjese pri izgaranju te time povoljno djeluju i na ispiranje cilindra.



*Slika 3.3 Shematski prikaz izmjene plinova u cilindru [4]*



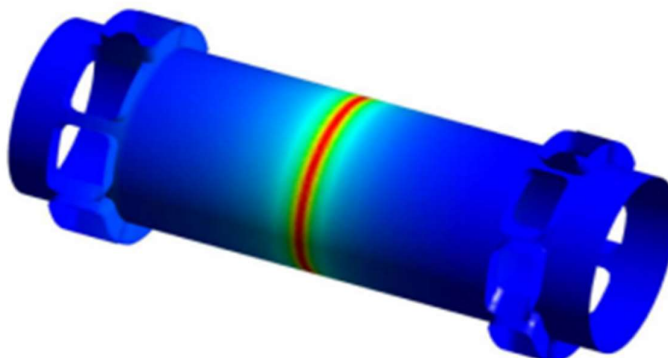
*Slika 3.4 Kompjuterski model ispiranja cilindra [4]*

### 3.5. Hlađenje cilindra

Sustav hlađenja za dvotaktni motor s nasuprotnim klipovima se bitno razlikuje od sustava hlađenja klasičnog četverotaktnog motora. Motor s nasuprotnim klipovima zahtjeva efikasno hlađenje u sredini cilindra gdje je toplinsko opterećenje visoko koncentrirani, uz to dodatnu potrebu za efikasnim hlađenjem stvara i manjak usisnog takta koji u četverotaktnim motorima dijelom hladi cilindar. Firma Achates je za analizu prijenosa topline na cilindar koristila kod za numeričku analizu strujanja fluida ANSYS CFX. Pomnom analizom prijenosa topline odlučili su se za hlađenje cilindra pomoću rashladnog plašta te su istraživali nekoliko izvedbi koje će biti prikazane u nastavku. Cilj je bio pronaći rješenje kojim će postići jednoliku raspodjelu temperature po dužini

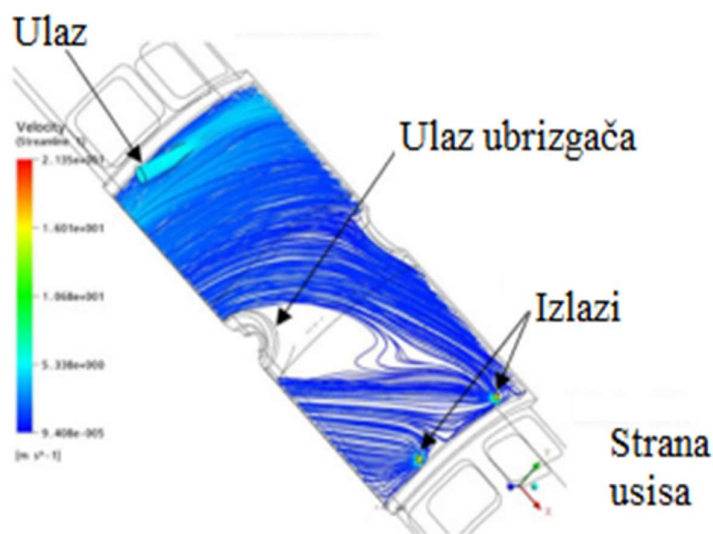


i obodu cilindra. Maksimalna dopuštena temperatura cilindra je postavljena na 270°C kako bi se očuvao uljni film unutar cilindra i time osigurala trajnost motora.



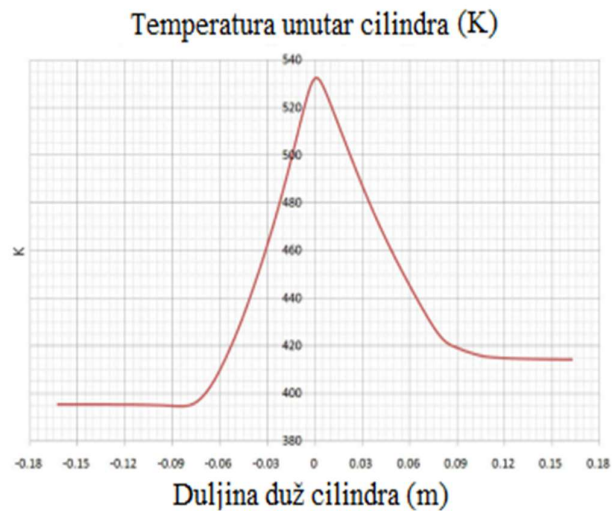
Slika 3.5 Prikaz toplinskog toka unutar cilindra pri izgaranju [4]

### 3.5.1. Rashladni plašt cijelom dužinom cilindra

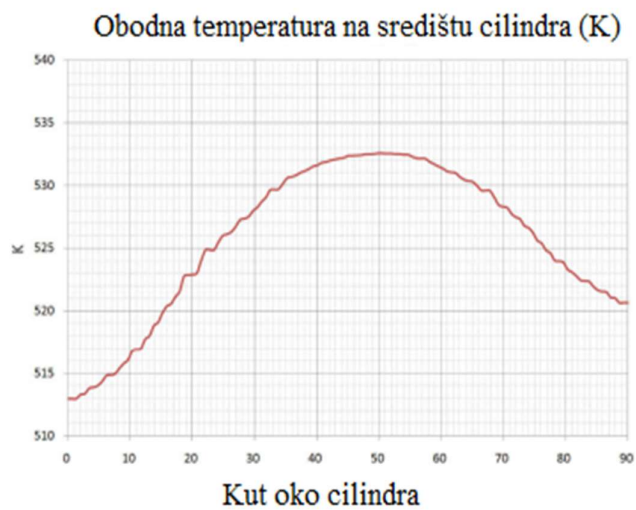


Slika 3.6 Prikaz toka rashladnog sredstva kroz rashladni plašt [4]

Kod ovog dizajna, rashladna tekućina ulazi u utor jednolike debljine na ispušnoj strani cilindra blizu ispušnih otvora. Rashladna tekućina slobodno teče preko i oko cilindra sve do izlaznih rupa smještenih iznad usisnih otvora. Plave linije na slici 3.6 označavaju brzinu protoka rashladne tekućine.



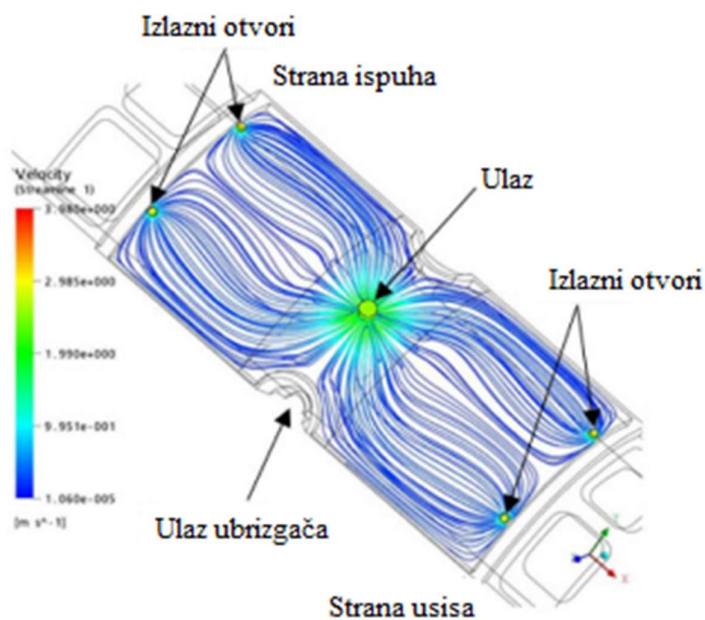
Slika 3.7 Graf raspodjele temperature dužinom cilindra [4]



Slika 3.8 Graf raspodjele temperature po obodu cilindra [4]

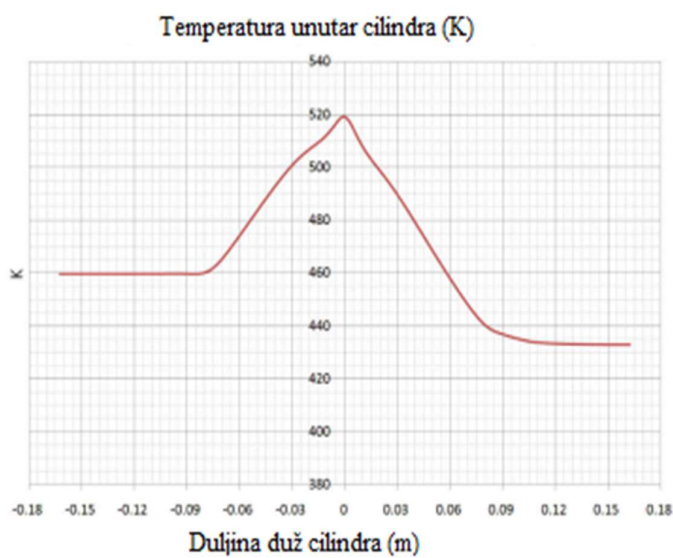
Kao što se vidi na slikama 3.7 i 3.8 ovakav dizajn rashladnog plašta je nepovoljan jer stvara vrlo nejednaku temperaturnu raspodjelu, kako po dužini cilindra tako i po obodu.

### 3.5.2. Rashladni plašt cijelom dužinom sa sudarnim mlazom na sredini cilindra

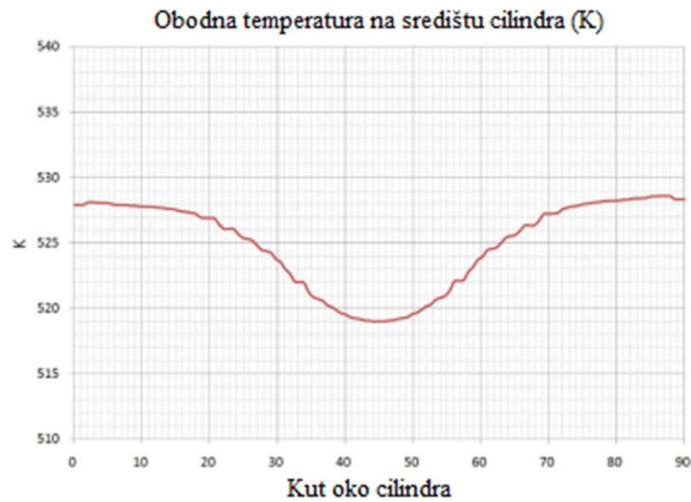


Slika 3.9 Prikaz toka rashladnog sredstva kroz rashladni plašt [4]

Kako bi se probao bolje riješiti problem koncentracije toplinskog toka na sredini cilindra analiziran je dizajn koji ima ulaz rashladnog medija na sredini cilindra. Rashladna tekućina ulazi kroz otvor te se sudara s vanjskim zidom cilindra i zatim širi po ostatku oboda i duljine.



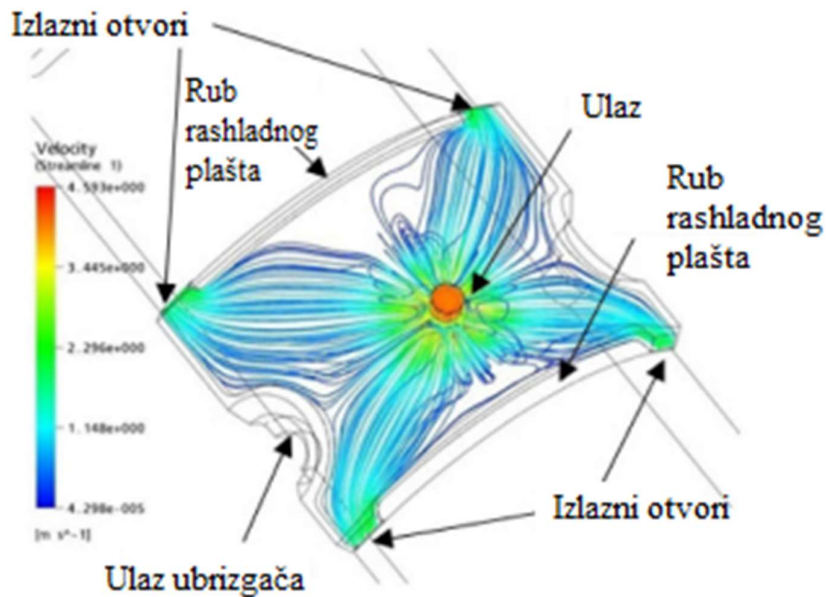
Slika 3.10 Graf raspodjele temperature duljinom cilindra [4]



Slika 3.11 Graf raspodjele temperature po obodu cilindra [4]

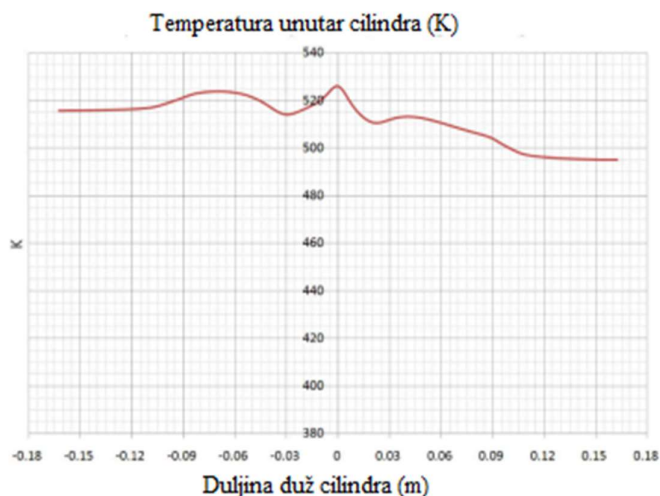
Slično kao i u prvom slučaju krajevi cilindra se hlade više nego što je potrebno. Također razlika u temperaturama između strane usisa i strane ispuha dovodi do nejednake toplinske dilatacije uzduž dužine cilindra (slika 3.10), ali razlika u obodnoj temperaturi je u ovom slučaju samo 9°C (slika 3.11) u usporedbi s 20°C u prethodnom dizajnu, što ukazuje na napredak.

### 3.5.3. Skraćeni rashladni plašt sa sudarnim mlazom na sredini cilindra

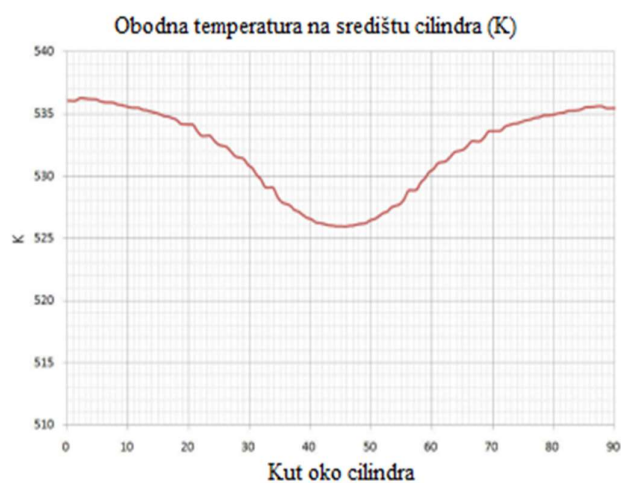


Slika 3.12 Prikaz toka rashladnog sredstva kroz rashladni plašt [4]

Rješenje za problem pretjeranog hlađenja krajeva cilindra traženo je u skraćivanju rashladnog plašta, on se više ne proteže od ispušnih do usisnih otvora već samo dijelom cilindra oko središta. Strana prema ispušnim otvora je napravljena malo dužom zbog nejednakosti raspodjele toplinskog toka između dvije strane cilindra.



Slika 3.13 Graf raspodjele temperature duljinom cilindra [4]

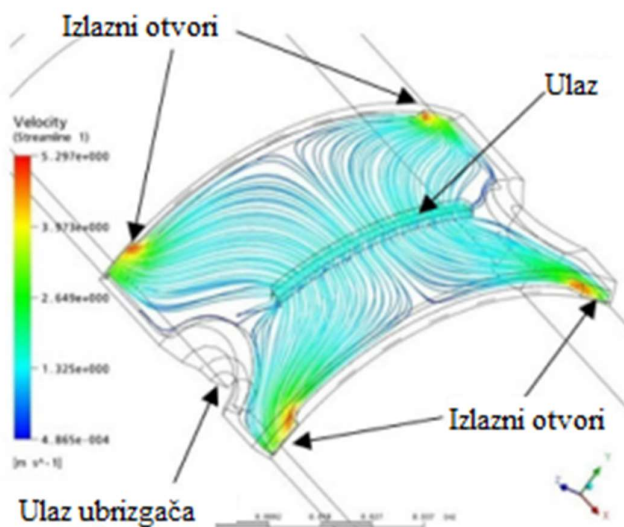


Slika 3.14 Graf raspodjele temperature po obodu cilindra [4]

Ovaj dizajn se pokazao kao dobro rješenje problema pretjeranog hlađenja krajeva cilindra te je razlika u temperaturi je smanjena na 30°C (slika 3.13). Ta razlika bi mogla biti dodatno smanjena daljnjim kraćenjem usisne strane rashladnog plašta. Dva pada u temperaturi vidljiva na grafu na slici 3.12, na duljinama -0.03 m i 0.025 m su nastala zbog dodatnog hlađenja koje nastaje na kraju rashladnog plašta gdje protok rashladne tekućine opada. Graf obodne temperature (slika 3.14) je

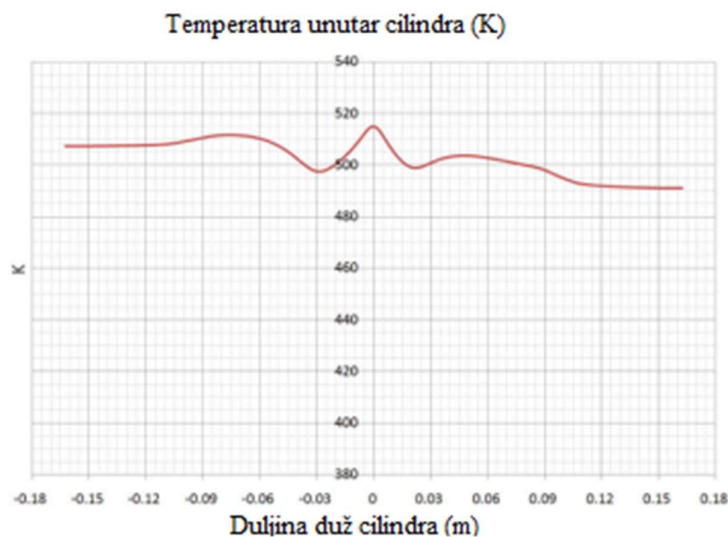
prilično sličan grafu prošlog rješenja te pokazuje da raspodjele temperature duž osi i oboda cilindra nisu povezane.

### 3.5.4. Skraćeni rashladni plašt s proreznim sudarnim mlazom na sredini cilindra

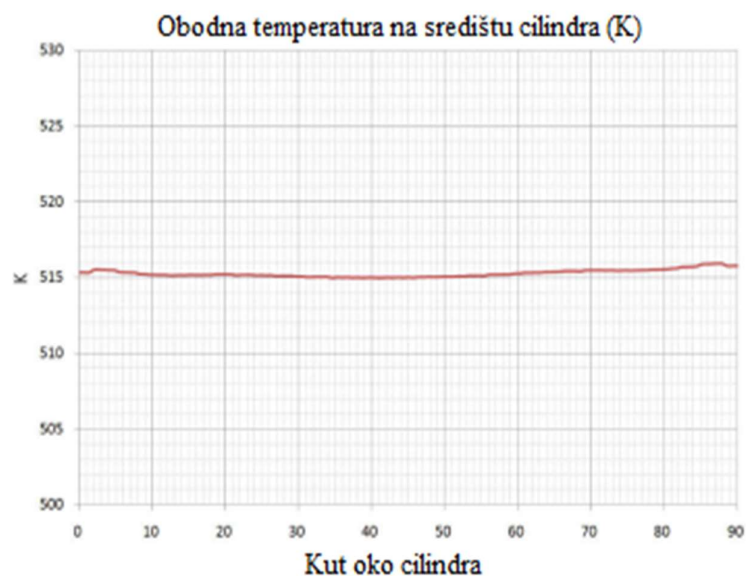


Slika 3.15 Prikaz toka rashladnog sredstva kroz rashladni plašt [4]

Kako bi dalje poboljšali raspodjelu temperature duž oboda cilindra, zamijenjen je jedan kružni ulazni otvor s proreznim ulazom na kojem se nalazi više otvora. Duljina rashladnog plašta je ostala nepromijenjena.



Slika 3.16 Graf raspodjele temperature duljinom cilindra [4]



*Slika 3.17 Graf raspodjele temperature po obodu cilindra [4]*

Graf na slici 3.17 pokazuje značajno poboljšanje u raspodjeli temperature po obodu, razlika u temperaturi je smanjena na samo 1°C, u usporedbi s razlikom od 9 do 20°C prethodnih dizajna. Graf raspodjele temperature duž osi cilindra (slika 3.16) je vrlo sličan prethodnome dizajnu što dodatno potvrđuje neovisnost osne i obodne raspodjele temperature unutar cilindra.

## 4. TERMODINAMIČKI PRORAČUN

### 4.1. Poznata svojstva motora

Za proračun je odabran Achates dizelski motor s nasuprotnim klipovima s mehaničkim prednabijanjem i prednabijanjem turbopuhalom, za primjenu u terenskim vozilima. Odabrani motor ima 3 cilindra, stapajni volumen svakog cilindra je 1,6 litara, a ukupna zapremnina jednaka je umnošku broja cilindra i stapajnog volumena te iznosi 4,8 litara. Stapajni volumen motora se kod klasičnih motora računa kao volumen koji klip opiše putem svoje donje i gornje mrtve točke, no kod motora s nasuprotnim klipovima se računa kao volumen između donjih mrtvih točaka dvaju klipova koji se nalaze unutar svakog cilindra. Svojstva prikazana u tablici 4.1 su pronađena u literaturi koju je proizvođač objavio na svojim stranicama.

Tablica 4.1 Poznata svojstva motora

Broj cilindara:	$z$	3	
Broj taktova:	$\tau$	2	
Brzina vrtnje:	$n$	2400	$\text{min}^{-1}$
		40	$\text{s}^{-1}$
Stapajni volumen:	$V_s$	1,6	L
Ukupna zapremnina:		4,8	L
Kompresijski volumen:	$V_c$	0,1	L
Stupanj povećanja tlaka:	$\psi$	1,3	
Stupanj povećanja volumena:	$\varphi$	2,1	
Stehiometrijska masa zraka za izgaranje:	$L_{st}$	14,7	kg/kg
Ogrjevna moć goriva:	$H_d$	43,5	MJ/kg
Temperatura ispušnih plinova:	$T_{isp}$	530	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura okolnog zraka:	$T_0$	20	$^{\circ}\text{C}$
Tlak u točki 1:	$p_1$	2	bar
Specifična toplina zraka:	$c_{p,z}$	1003,5	J/kgK
Specifična toplina ispušnih plinova:	$c_{p,isp}$	1160	J/kgK
Protok rashladne vode:	$m_{rv}$	2	kg/s
Specifična toplina vode:	$c_{p,v}$	4187	J/kgK

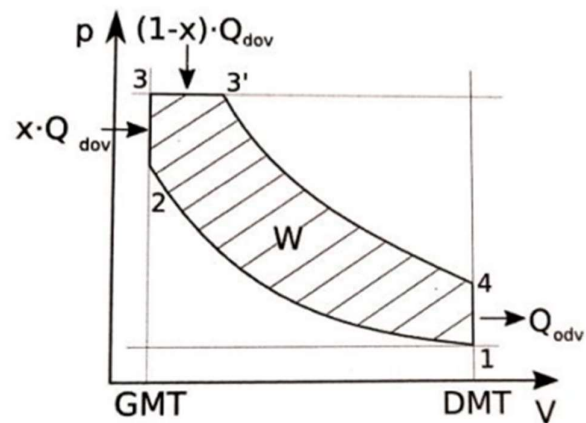




Slika 4.1 Achatas 4,8 litreni motor

#### 4.2. Određivanje stanja u krajnjim točkama Sabatheovog procesa

Sabatheov proces sastoji se od dvije adijabate, dvije izohore i jedne izobare. Usis i adijabatska kompresija čistog zraka odvija se od točke 1 do točke 2, te se ubrizgava gorivo. Izgaranje gorive smjese se dijelom odvija izohorno od točke 2 do točke 3, a dijelom izobarno od točke 3 do točke 3'. Zatim se odvija adijabatska ekspanzija od točke 3' do točke 4.



Slika 4.2 p-V dijagram Sabatheovog procesa [2]

#### 4.2.1. Točka 1 – kraj usisa

Vrijednost tlaka na ulazu u motor iznosi 2 bara zbog sustava prednabijanja koji se koristi u motoru, volumen jednog cilindra 1,6 litara. Temperatura zraka je povišena u odnosu na temperaturu okoline zbog sustava prednabijanja koji uz povišenje tlaka povisuje i temperaturu ulaznog zraka. Poznavanjem početnog tlaka, volumena i temperature možemo izračunati masu zraka prema izrazu (4.1).

$$m_1 = \frac{p_1 * V_1}{R_z * T_1} \quad (4.1)$$

- gdje je:

$p_1$  – tlak u točki 1

$T_1$  – temperatura u točki 1

$R_z$  – plinska konstanta zraka

$$m_1 = \frac{p_1 * V_1}{R_z * T_1} = \frac{2 * 10^5 \text{ Pa} * 1,6 * 10^{-3} \text{ m}^3}{287,1 \text{ J/kgK} * 350 \text{ K}} = 3,18 * 10^{-3} \text{ kg}$$

#### 4.2.2. Točka 2 – početak izgaranja

Od točke 1 do točke 2 odvija se adijabatska kompresija usisanog čistog zraka pri kojoj rastu tlak i temperatura u ovisnosti o adijabatskom eksponentu  $\kappa$ . Pomoću izraza (4.2) dobijemo tlak, a pomoću izraza (4.3) dobijemo temperaturu u točki 2.

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^\kappa \quad (4.2)$$

- gdje je:

$\kappa$  - eksponent adijabate (iznosi 1,4 za čisti zrak)

$V_2$  – volumen u točki 2 (jednak kompresijskom volumenu  $V_c$ )

$$p_2 = p_1 * \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^\kappa = 2 \text{ bar} * \left(\frac{1,6 * 10^{-3} \text{ m}^3}{1 * 10^{-4} \text{ m}^3}\right)^{1,4} = 97 \text{ bar}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\kappa-1} \quad (4.3)$$

$$T_2 = T_1 * \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\kappa-1} = 350 \text{ K} * \left(\frac{1,6 * 10^{-3} \text{ m}^3}{1 * 10^{-4} \text{ m}^3}\right)^{1,4-1} = 1061 \text{ K}$$

#### 4.2.3. Točka 3 – početak ekspanzije

Promjena stanja koja se odvija od točke 2 do točke 3 je izohora, što znači da se povisuje temperatura uz konstantan volumen. Tlak u točki 3 se računa prema izrazu (4.4), a temperatura prema izrazu (4.5).

-volumen  $V_3 = V_2 = V_c = 0,1 \text{ L} = 1 * 10^{-4} \text{ m}^3$

$$\frac{p_3}{p_2} = \psi \quad (4.4)$$

- gdje je:

$\psi$  – stupanj povećanja tlaka koji iznosi 1,3

$$p_3 = p_2 * \psi = 97 \text{ bar} * 1,3 = 126,1 \text{ bar}$$

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{p_3}{p_2} \quad (4.5)$$

$$T_3 = T_2 * \frac{p_3}{p_2} = T_2 * \psi = 1061 \text{ K} * 1,3 = 1379,3 \text{ K}$$

#### 4.2.4. Točka 3' – kraj izgaranja

Između točaka 3 i 3' događa se izobarna ekspanzija što znači da se pri konstantom tlaku, volumen i temperatura mijenjaju. Volumen u točki 3' se dobije pomoću izraza (4.6), a temperaturu pomoću izraza (4.7).

$$\frac{V_{3'}}{V_3} = \varphi \quad (4.6)$$

- gdje je:

$\varphi$  – stupanj povećanja volumena koji iznosi 2,1

$$V_{3'} = V_3 * \varphi = 1 * 10^{-4} \text{ m}^3 * 2,1 = 2,1 * 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\frac{T_{3'}}{T_3} = \frac{V_{3'}}{V_3} \quad (4.7)$$

$$T_{3'} = T_3 * \frac{V_{3'}}{V_3} = T_3 * \varphi = 1379,3 \text{ K} * 2,1 = 2896,53 \text{ K}$$

#### 4.2.5. Točka 4 – kraj ekspanzije

Između točaka 3' i 4 odvija se adijabatska ekspanzija pri kojoj se mijenjaju volumen, temperatura i tlak u ovisnosti od adijabatskom eksponentu  $\kappa$ . Tlak u točki 4 dobijemo pomoću izraza (4.8), a temperaturu dobijemo pomoću izraza (4.9), dok je volumen jednak volumenu u točki 1.

-volumen  $V_4 = V_1 = V_s = 1,6 \text{ L} = 1,6 * 10^{-3} \text{ m}^3$

$$\frac{p_4}{p_3} = \left(\frac{V_{3'}}{V_4}\right)^\kappa \quad (4.8)$$

$$p_4 = p_{3'} * \left(\frac{V_{3'}}{V_4}\right)^\kappa = 126,1 \text{ bar} * \left(\frac{2,1 * 10^{-4} \text{ m}^3}{1,6 * 10^{-3} \text{ m}^3}\right)^{1,4} = 7,35 \text{ bar}$$

$$\frac{T_4}{T_{3'}} = \left(\frac{V_{3'}}{V_4}\right)^{\kappa-1} \quad (4.9)$$

$$T_4 = T_{3'} * \left(\frac{V_{3'}}{V_4}\right)^{\kappa-1} = 2896,53 \text{ K} * \left(\frac{2,1 * 10^{-4} \text{ m}^3}{1,6 * 10^{-3} \text{ m}^3}\right)^{1,4-1} = 1285,64 \text{ K}$$

### 4.3. Određivanje kompresijskog omjera $\varepsilon$

Kompresijski omjer  $\varepsilon$  računamo prema izrazu (4.10):

$$\varepsilon = \frac{V_s}{V_c} - 1 \quad (4.10)$$

- gdje je:

$V_s$  – stapajni volumen

$V_c$  – kompresijski volumen

$$\varepsilon = \frac{V_s}{V_c} - 1 = \frac{1,6 \text{ L}}{0,1 \text{ L}} - 1 = 15$$

#### 4.4. Određivanje termodinamičkog stupnja djelovanja Sabatheov-og procesa

Za izračun termodinamičkog stupnja ovog procesa potrebno je znati stupanj kompresije, stupanj povećanja volumena, tlaka te adijabatski eksponent kako bi upotrijebili izraz (4.11).

$$\eta_{t,Sabathe} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} * \frac{(\psi * \varphi^{\kappa} - 1)}{(\psi - 1) + \kappa * \psi * (\varphi - 1)} \quad (4.11)$$

- gdje je:

$\kappa$  – adijabatski eksponent

$\varepsilon$  – stupanj kompresije

$\varphi$  – stupanj povećanja volumena

$\psi$  – stupanj povećanja tlaka

$$\eta_{t,Sabathe} = 1 - \frac{1}{15^{1,4-1}} * \frac{(1,3 * 2,1^{1,4} - 1)}{(1,3 - 1) + 1,4 * 1,3 * (2,1 - 1)} = 0,6069$$

Termodinamički stupanj Sabatheov-og procesa iznosi 0,6069 odnosno 60,69%.

#### 4.5. Određivanje mase goriva u procesu

Formulu za izračun mase goriva u procesu možemo izvesti pomoću izraza (4.12).

$$m_z = m_g * L_{st} * \lambda \quad (4.12)$$

- gdje je:

$m_g$  – masena potrošnja goriva u procesu

$L_{st}$  – stehiometrijska maza zraka za izgaranje

$\lambda$  – pretičak zraka

$$m_g = \frac{m_z}{L_{st} * \lambda} = \frac{3,18 * 10^{-3} \text{ kg}}{14,7 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} * 1,9} = 1,139 * 10^{-4} \text{ kg}$$

#### 4.6. Određivanje masene potrošnje

Masena potrošnja za cijeli motor se računa prema izrazu (4.13).

$$B = m_g * z * n * \frac{2}{\tau} \quad (4.13)$$

- gdje je:

$z$  – broj cilindara

$n$  – broj okretaja motora

$\tau$  – broj taktova

$$B = m_g * z * n * \frac{2}{\tau} = 1,139 * 10^{-4} \text{ kg} * 3 * 40\text{s}^{-1} * \frac{2}{2} = 0,0137 \text{ kg/s}$$

#### 4.7. Određivanje toplinskog toka

Toplinski tok se računa prema izrazu (4.14).

$$\dot{Q}_g = B * H_d \quad (4.14)$$

- gdje je:

$H_d$  – donja ogrijevna moć goriva

$$\dot{Q}_g = B * H_d = 0,0137 \text{ kg/s} * 43,5 \text{ MJ/kg} = 595,95 \text{ kW}$$

#### 4.8. Određivanje masenog protoka zraka

Maseni protok zraka računa se pomoću izraza (4.15).

$$\dot{m}_z = B * L_{st} * \lambda \quad (4.15)$$

- gdje je:

$L_{st}$  – stehiometrijska maza zraka za izgaranje

$\lambda$  – pretičak zraka

$$\dot{m}_z = B * L_{st} * \lambda = 0,0137 \text{ kg/s} * 14,7 \text{ kg/kg} * 1,9 = 0,383 \text{ kg/s}$$

#### 4.9. Određivanje efektivnog stupnja djelovanja

Kako bi odredili efektivni stupanj djelovanja usvajamo da je omjer efektivnog i termodinamičkog stupnja djelovanja jednak 0,65 kao što je prikazano u izrazu (4.16).

$$\frac{\eta_{ef}}{\eta_t} = 0,65 \quad (4.16)$$

- gdje je:

$\eta_{ef}$  – efektivni stupanj djelovanja

$\eta_t$  – termodinamički stupanj djelovanja

$$\eta_{ef} = 0,65 * \eta_t = 0,65 * 0,6069 = 0,3945$$

Efektivni stupanj djelovanja iznosi 0,3945 odnosno 39,45%.

#### 4.10. Određivanje efektivne snage

Formulu za efektivnu snagu možemo izvesti pomoću izraza za efektivni stupanj djelovanja (4.17).

$$\eta_{ef} = \frac{P_{ef}}{\dot{Q}_g} \quad (4.17)$$

- gdje je:

$P_{ef}$  – efektivna snaga

$\dot{Q}_g$  – toplinski tok

$$P_{ef} = \dot{Q}_g * \eta_{ef} = 595,95 \text{ kW} * 0,3945 = 235,1 \text{ kW}$$

#### 4.11. Određivanje efektivnog rada

Formulu za efektivni rad možemo izvesti pomoću formule za efektivnu snagu (4.18).

$$P_{ef} = W_{ef} * z * n * \frac{2}{\tau} \quad (4.18)$$

$$W_{\text{ef}} = \frac{P_{\text{ef}}}{z * n * \frac{2}{\tau}} = \frac{235,1 * 10^3 \text{ W}}{3 * 40 \text{ s}^{-1} * \frac{2}{2}} = 1958,33 \text{ J/pc}$$

#### 4.12. Određivanje specifične potrošnje goriva

Specifičnu potrošnju goriva računamo prema izrazu (4.19).

$$BSFC = \frac{B * 3600}{P_{\text{ef}}} \quad (4.19)$$

$$BSFC = \frac{B * 3600}{P_{\text{ef}}} = \frac{0,0137 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 3600}{235,1 \text{ kW}} = 0,210 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} = 210 \text{ g/kWh}$$

#### 4.13. Određivanje kutne brzine

Kutna brzina se računa prema izrazu (4.20).

$$\omega = 2 * \pi * n \quad (4.20)$$

$$\omega = 2 * \pi * n = 2 * \pi * 40 \text{ s}^{-1} = 251,33 \text{ s}^{-1}$$

#### 4.14. Okretni moment

Okretni moment računamo kao omjer efektivne snage i kutne brzine, kao što je prikazano u izrazu (2.11).

$$M = \frac{P_{\text{ef}}}{\omega} \quad (4.21)$$

$$M = \frac{P_{\text{ef}}}{\omega} = \frac{235,1 * 10^3 \text{ W}}{251,33 \text{ s}^{-1}} = 935,42 \text{ Nm}$$



#### 4.15. Određivanje srednjeg efektivnog tlaka

Srednji efektivni tlak računamo kao omjer efektivnog rada i stapajnog volumena, što je prikazano u izrazu (4.22).

$$p_{sr,ef} = \frac{W_{ef}}{V_s} \quad (4.22)$$
$$p_{sr,ef} = \frac{1958,33 J}{1,5 * 10^{-3} m^3} = 1305553,33 Pa = 13,06 bar$$

#### 4.16. Određivanje toplinskog toka predanog rashladnoj vodi

U motoru se koristi vodeno hlađenje te je potrebno odrediti koliki je iznos toplinskog toka predanog rashladnoj vodi. Toplinski tok se računa prema izrazu (4.23). Uzima se povišenje temperature rashladne vode od 5K.

$$\dot{Q}_{RV} = \dot{m}_{RV} * c_{p,v} * \Delta T_{RV} \quad (4.23)$$

- gdje je:

$\dot{m}_{RV}$  – protok rashladne vode

$c_{p,v}$  – specifična toplina vode

$\Delta T_{RV}$  – promjena temperature rashladne vode

$$\dot{Q}_{RV} = \dot{m}_{RV} * c_{p,v} * \Delta T_{RV} = 2 \text{ kg/s} * 4187 \text{ J/kgK} * 5 \text{ K} = 41,9 \text{ kW}$$

#### 4.17. Određivanje toplinskog toka odvedenog ispušnim plinovima

Toplinski tok odveden ispušnim plinovima računa se prema izrazu (4.24).

$$\dot{Q}_{ISP} = (\dot{m}_z + B) * c_{p,isp} * (T_{isp} - T_0) \quad (4.24)$$

- gdje je:

$\dot{m}_z$  – maseni protok zraka

$c_{p,isp}$  – specifična toplina ispušnih plinova

B – masena potrošnja goriva

$T_{isp}$  – temperatura ispušnih plinova

$T_0$  – temperatura okoline

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{ISP} &= (\dot{m}_z + \dot{m}_g) * c_{p,isp} * (T_{isp} - T_0) = \\ \dot{Q}_{ISP} &= \left(0,383 \frac{\text{kg}}{\text{s}} + 0,0137 \frac{\text{kg}}{\text{s}}\right) * 1160 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} * (530^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = \\ \dot{Q}_{ISP} &= 234687,7 \text{ W} = 234,5 \text{ kW}\end{aligned}$$

#### 4.18. Određivanje toplinskog toka predanog zraku za izgaranje nakon prednabijanja

Zbog prednabijanja zraka u motoru potrebno je odrediti toplinski tok predan zraku za izgaranje nakon prednabijanja i to se određuje pomoću izraza (2.15).

$$\dot{Q}_z = \dot{m}_z * c_{p,z} * \Delta T_z \quad (4.25)$$

- gdje je:

$\dot{m}_z$  – maseni protok zraka

$\Delta T_z$  – promjena temperature zraka (usvojena vrijednost od 80 K)

$$\dot{Q}_z = \dot{m}_z * c_{p,z} * \Delta T_z = 0,383 \text{ kg/s} * 1003,5 \text{ J/kgK} * 80 \text{ K} = 30,8 \text{ kW}$$

#### 4.19. Određivanje toplinskog toka predanog s motora izravno na okolni zrak

Kućište motora se zagrijava i predaje toplinu okolini, zato se toplinski tok računa prema izrazu (2.16).

$$\dot{Q} = \dot{Q}_g - (\dot{Q}_{RV} + \dot{Q}_{ISP} + \dot{Q}_z + P_{ef}) \quad (4.26)$$

- gdje je:

$\dot{Q}_g$  – toplinski tok u procesu

$\dot{Q}_{ISP}$  – toplinski tok odveden ispušnim plinovima

$P_{ef}$  – efektivna snaga

$$\dot{Q} = \dot{Q}_g - (\dot{Q}_{RV} + \dot{Q}_{ISP} + \dot{Q}_z + P_{ef}) =$$

$$\dot{Q} = 595,95 \text{ kW} - (41,9 \text{ kW} + 234,5 \text{ kW} + 30,8 \text{ kW} + 235,1 \text{ kW}) =$$

$$\dot{Q} = 53,65 \text{ kW}$$

## 5. ZAKLJUČAK

Sami dizelski motori imaju mnogo vrлина poput odlične potrošnje goriva, visokog okretnog momenta pri niskim okretajima te visoke pouzdanosti i izdržljivosti zbog čega su postali nezamjenjivi dio globalnog gospodarstva budući da su ugrađeni u približno svaki teretni kamion. Najveća mana im je definitivno loša emisija ispušnih plinova koja sadrži velike količine dušikovih oksida, čađe, crnog dima i kancerogenih čestica.

Dizelski motori s nasuprotnim klipovima uz sve ranije navedene vrline imaju dodatne prednosti zbog svoje konstrukcije. Budući da se u jednom cilindru nalaze dva klipa koja zajedno tvore komoru izgaranja, otklonjena je potreba za cilindarskom glavom što povećava efikasnost. Uz cilindarsku glavu otklonjeni su i ventili te bregasto vratilo, što pojednostavljuje konstrukciju motora koja umjesto ventila ima otvore u cilindru za usis i ispuh koji se otvaraju i zatvaraju kretanjem klipova duž cilindra. Efikasnost je veća i jer su za razliku od klasičnih četverotaktnih dizelskih motora, motori s nasuprotnim klipovima dvotaktni.

U ovo vrijeme kada norme za ispušne plinove postaju sve strože, te se najavljuje potpuno obustavljanje proizvodnje motora s unutarnjim izgaranjem u narednim godinama, sigurno bi se moglo pronaći mjesto za motore s nasuprotnim klipovima. Budući da elektrifikacija zasada još nije moguća za osobne automobile, a teretna vozila pogotovo, ovakav motor, koji s manjom zapreminom i potrošnjom ostvaruje jednaku snagu kao i klasični dizelski motor, mogao bi biti vrlo uspješan na tržištu.

## LITERATURA

- [1] Pirault, J.P., Flint M.: „Opposed Piston Engines: Evolution, Use, and Future Applications“, SAE International, Sjedinjene Američke Države, 2010.
- [2] Senčić, T.: “Materijal uz kolegij Toplinski strojevi i uređaji“
- [3] Dr. Regner G., i dr.: „Modernizing the Opposed-Piston, Two-Stroke Engine for Clean, Efficient Transportation“, SAE International, Sjedinjene Američke Države, 2014.
- [4] Lee, P., Wahl M.: „Cylinder Cooling for Improved Durability on an Opposed-Piston Engine“, SAE International, Sjedinjene Američke Države, 2012.
- [5] Herold, R. i dr.: „Thermodynamic Benefits of Opposed-Piston Two-Stroke Engines“, SAE International, Sjedinjene Američke Države, 2011.
- [6] Gardner, G.: „Opposed-piston engine: New breakthrough with old tech?“, s Interneta, <https://www.stuff.co.nz/motoring/news/75502564/opposed-piston-engine-new-breakthrough-with-old-tech>, 30.12.2015.

## POPIS SLIKA

Slika 2.1 Motor Oechelhaeusera i Junkersa [1].....	4
Slika 2.2 Prikaz Junkers Jumo 207 zrakoplovnog motora [1].....	5
Slika 2.3 MAP motor ugrađen u auto za utrku Le Mans 24h [1].....	6
Slika 2.4 Rolls-Royce k60 motor [1] .....	6
Slika 2.5 Prikaz presjeka Napier Deltic motora [1] .....	7
Slika 2.6 Fairbanks Morse 38D818 [1].....	7
Slika 3.1 Proces četverotaktnog motora [2] .....	8
Slika 3.2 Pojednostavljeni prikaz Achates motora s nasuprotnim klipovima [6] .....	10
Slika 3.3 Shematski prikaz izmjene plinova u cilindru [4] .....	11
Slika 3.4 Kompjuterski model ispiranja cilindra [4].....	11
Slika 3.5 Prikaz toplinskog toka unutar cilindra pri izgaranju [4] .....	12
Slika 3.6 Prikaz toka rashladnog sredstva kroz rashladni plašt [4].....	12
Slika 3.7 Graf raspodjele temperature duljinom cilindra [4] .....	13
Slika 3.8 Graf raspodjele temperature po obodu cilindra [4].....	13
Slika 3.9 Prikaz toka rashladnog sredstva kroz rashladni plašt [4].....	14
Slika 3.10 Graf raspodjele temperature duljinom cilindra [4] .....	14
Slika 3.11 Graf raspodjele temperature po obodu cilindra [4].....	15
Slika 3.12 Prikaz toka rashladnog sredstva kroz rashladni plašt [4].....	15
Slika 3.13 Graf raspodjele temperature duljinom cilindra [4] .....	16
Slika 3.14 Graf raspodjele temperature po obodu cilindra [4].....	16
Slika 3.15 Prikaz toka rashladnog sredstva kroz rashladni plašt [4].....	17
Slika 3.16 Graf raspodjele temperature duljinom cilindra [4] .....	17
Slika 3.17 Graf raspodjele temperature po obodu cilindra [4].....	18
Slika 4.1 Achates 4,8 litreni motor.....	20
Slika 4.2 p-V dijagram Sabatheovog procesa [2].....	20

## SAŽETAK

Dizelski motori su svuda oko nas, u velikom broju osobnih automobila te većini teretnih vozila. Vrlo su popularni zbog visoke iskoristivosti, velikog okretnog momenta te izvrsne pouzdanosti. Njihova najveća mana je emisija ispušnih plinova koji sadrže dušikov oksid, čađu te crni dim koji sa sobom nosi kancerogene čestice. Kako bi unaprijedili dizelski motor tvrtka Achates je razvila dizelski motor s nasuprotnim klipovima koji je tema ovog rada. Ukratko je opisan početni razvoj motora s nasuprotnim klipovima, to jest razvoj bitnih karakteristika koje se koriste i u modernim izvedbama te je navedeno nekoliko uspješnih motora s nasuprotnim klipova kroz povijest. Opisane su glavne karakteristike Achates motora, te razlike između motora s nasuprotnim klipovima i klasičnog dizelskog motora. Napravljen je termodinamički proračun jednog motora iz ponude tvrtke Achates koristeći podatke pronađene na stranici tvrtke.

**Ključne riječi:** motori s unutarnjim izgaranjem, dizelski motor, Achates motor s nasuprotnim klipovima

## **ABSTRACT**

Diesel engines are all around us, in the majority of trucks and in many passenger cars. They are very popular due to their high efficiency, high torque and excellent reliability. Their biggest flaw is the emission of exhaust gases that contain nitrogen oxide, soot and black smoke that carries carcinogenic particles. In order to improve the diesel engine, the Achates company developed a diesel engine with opposed pistons, which is the subject of this paper. The initial development of engines with opposed pistons is briefly described, that is, the development of essential characteristics that are used in modern versions as well, and several other successful engines with opposed pistons are listed. The main characteristics of the Achates engine are described, as well as the differences between the engine with opposed pistons and the classic diesel engine. A thermodynamic calculation of an engine from the company Achates was made using data found on the company's website.

**Key words:** Internal combustion engine, diesel engine, Achates opposed piston engine