

# Analiza i usporedba turboventilatorskih motora

---

**Dejanović, Marina**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*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:190:686604>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-17**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
**TEHNIČKI FAKULTET**

Preddiplomski stručni studij strojarstva

Završni rad

**ANALIZA I USPOREDBA TURBOVENTILATORSKIH  
MOTORA**

Rijeka, rujan 2023.

Marina Dejanović  
00690736944

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
**TEHNIČKI FAKULTET**

Preddiplomski stručni studij strojarstva

Završni rad

**ANALIZA I USPOREDBA TURBOVENTILATORSKIH  
MOTORA**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Vedran Mrzljak

Rijeka, rujan 2023.

Marina Dejanović  
00690736944

Rijeka, 3. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za termodinamiku i energetiku**  
Predmet: **Toplinski strojevi i uređaji 2**  
Grana: **2.11.02 procesno energetska strojarstvo**

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Marina Dejanović (0069073694)**  
Studij: **Stručni prijediplomski studij strojarstva**

Zadatak: **Analiza i usporedba turboventilatorskih motora / Turbofan engines analysis and comparison**

### Opis zadatka:

Na temelju zadanih radnih parametara dobivenih u eksploataciji, provesti energijsku i eksergijsku analizu za tri turboventilatorska motora i njihove sastavne komponente. Dobivene rezultate prikazati, komentirati i usporediti. Kod eksergijske analize provesti ispitivanje utjecaja promjene temperature okoline na iskoristivosti i gubitke svakog motora i njegovih sastavnih komponenti.

Polje znanstvenog područja: **Strojarstvo**

Grana znanstvenog područja: **Procesno i energetska strojarstvo**

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

*Dejanović*

Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:

*Vedran Mrzljak*

Izv. prof. dr. sc. Vedran Mrzljak

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

*KS.*

Izv. prof. dr. sc. Samir Žic

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno, koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se svom mentoru izv. prof. dr. sc. Vedranu Mrzljaku na svim savjetima, te na utrošenom vremenu i trudu.

Posebno se želim zahvaliti svojoj obitelji i Mateu na strpljenju i podršci koju su mi pružali tijekom studiranja.

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. TURBOVENTILATORSKI MOTORI.....	3
2.1. Konstrukcija turboventilatorskih motora .....	3
2.1.1. Dijelovi jezgre motora .....	3
2.1.2. Konstrukcijski elementi izvan jezgre motora .....	7
2.2. Idealni i realni (stvarni) procesi plinske turbine.....	8
2.2.1. Idealni Braytonov proces .....	9
2.2.2. Stvarni Braytonov proces .....	9
2.3. Princip rada turboventilatorskih motora .....	10
3. PRORAČUN TURBOVENTILATORSKIH MOTORA.....	12
3.1. Ulazni podaci svih pojedinih motora i njihove sheme.....	12
3.2. Proračun .....	15
3.2.1. Proračun energije.....	15
3.2.2. Proračun eksergije .....	22
4. REZULTATI DOBIVENI PRORAČUNOM.....	27
4.1. Rezultati proračuna energije.....	27
4.2. Rezultati proračuna eksergije .....	33
5. USPOREDBA I ANALIZA EKSERGIJE U OVISNOSTI O STANJU OKOLINE .....	37
6. ZAKLJUČAK.....	42
LITERATURA .....	43
POPIS SLIKA.....	44
POPIS TABLICA .....	46
POPIS OZNAKA.....	47
SAŽETAK.....	48
SUMMARY.....	48

## 1. UVOD

Hrvatska enciklopedija definira mlazne motore kao motore za pogon letjelica u kojima se energija goriva izgaranjem pretvara u kinetičku energiju mlaza plinova što velikom brzinom struje unatrag kroz mlaznicu, tj. sapnicu motora [1]. Prvu sličnost s mlaznim motorima u povijesti datiramo u 1. stoljeće kad je starogrčki matematičar i izumitelj, Heron iz Aleksandrije, napravio kuglu koja se mogla okretati oko svoje osi, a koja je bila pogonjena ispuštanjem pare iz dvije zavojne cijevi smještene na ekvatoru same kugle. Taj izum, stvoren iz puke znatiženje, nikad nije korišten u mehaničke svrhe. Zatim su Kinezi, igrom slučaja, u 13. stoljeću našli praktičnu namjenu za mlazni pogon – izumom vatrometa. Svi pokušaji pronalaska svrhe za mlazni pogon, uključujući i onaj iz Osmanskog Carstva u 17. stoljeću za pogon rakete, u konačnici su dali dobru podlogu inženjerima koji su došli na ideju konstrukcije mlaznih zrakoplova.

Smatra se kako je prvi od njih bio francuski inženjer Maxime Guillaume koji je 1922. osmislio jednostavni mlazni motor koji se sastojao od niza turbina što su komprimirale zrak koji se onda miješao u gorivu smjesu s gorivom. Zatim bi se ta smjesa zapalila, a brza ekspanzija plina stvarala je potisak. Prvi kojem je pošlo od ruke da ovaj koncept provede u djelo bio je britanski inženjer Frank Whittle. Njegova je tvrtka 1937. stvorila prvi radni mlazni motor na kojem su i neki današnji moderni turbomlazni motori bazirani. Istu ideju imao je i dr. Hans von Ohain, njemački fizičar čiji je *dizajn* korišten u mlaznoj letjelici Heinkel He 178 koja je poletjela 1939. godine.

Mlazni se motori također nazivaju i plinske turbine jer u njima ekspandira plinoviti radni medij, a dijelimo ih prema: načinu predaje energije (turbomlazne, turboventilatorske, turbopropelerske, turboosovinske), primjeni (za pogon zrakoplova, za proizvodnju električne energije, za pogon plovila, itd.), porijeklu (avionsko, industrijsko), broju vratila (eng. *single shaft*, *double shaft*, *twin shaft*), te smještaju pogonskog vratila (s grijanim i hlađenim krajevima) [2]. Osnovni sastav svakog plinskoturbinskog postrojenja uključuje kompresor, komoru izgaranja i turbinu [3], i ti će dijelovi biti podrobnije opisani u nastavku. Jedan od dijelova mlaznih motora je i sama mlaznica kojoj duguju svoje ime i mogućnost postizanja velikih izlaznih brzina.

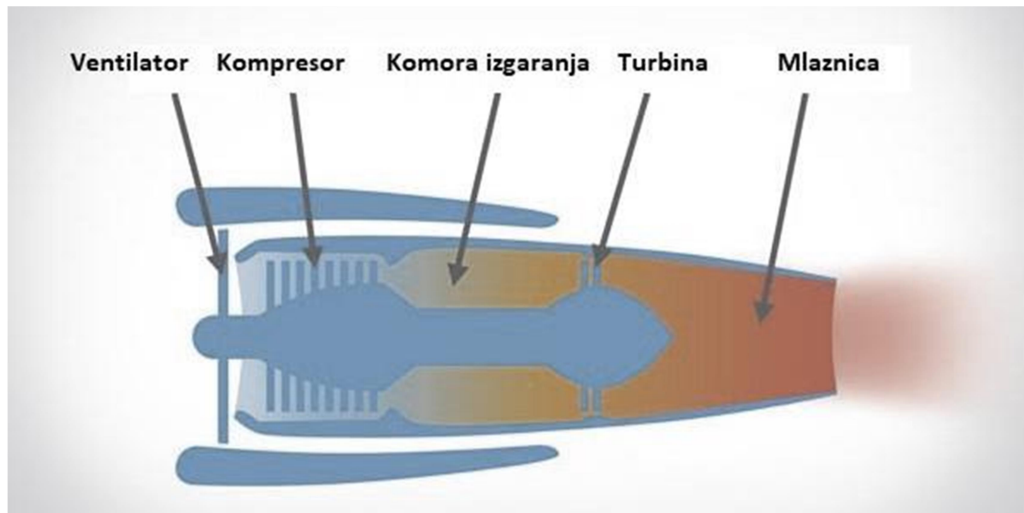


Ovaj tip zrakoplova također možemo podijeliti i s obzirom na to lete li brže ili sporije od brzine zvuka, pa tako razlikujemo podzvučne i nadzvučne. Najveći je nedostatak podzvučnih zrakoplova buka koju stvara motor pri radu, te se stoga na putničke avione ugrađuju turboventilatorski motori koji zahvaljujući svojoj konstrukciji stvaraju manje buke. Takvi su zrakoplovi u usporedbi s onima koje pokreću motori s unutarnjim izgaranjem obično jači i brži i istovremeno mogu prenositi više korisnog tereta. Nadzvučni mlazni avioni se koriste u vojne svrhe. Lovački avioni, tj. lovci, opremljeni su sustavom za dodatno izgaranje koji im omogućuje povećanu snagu potiska u kratkom vremenu.

Ovaj rad se bavi turboventilatorskim motorima, te uključuje opise njihovih sastavnih dijelova i način rada svakog od njih, pojedinačno i u cjelini. Prikazana je usporedba i analiza (energijska i eksergijska) tri turboventilatorska motora, te proračun svih komponenti zadanih motora.

## 2. TURBOVENTILATORSKI MOTORI

### 2.1. Konstrukcija turboventilatorskih motora



Slika 2.1.1.: Dijelovi turboventilatorskog motora

Slika 2.1.1. prikazuje osnovne dijelove turboventilatorskog motora, odnosno: kompresor, komoru izgaranja i turbinu. Te tri komponente zajedno zovemo jezgra. Budući da govorimo o turboventilatorskim motorima, moramo spomenuti i konstrukcijske elemente izvan jezgre motora, a to su: usisnik zraka, ventilator i mlaznica.

#### 2.1.1. Dijelovi jezgre motora

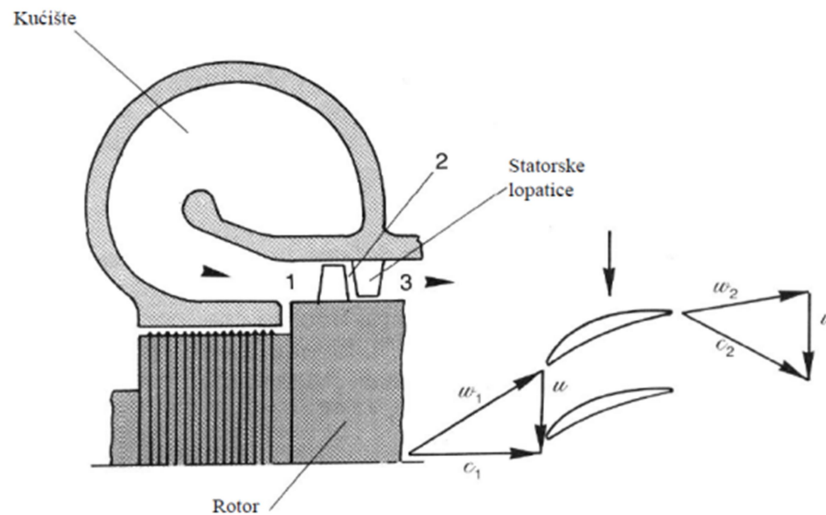
**Kompresori** su naprave za stlačivanje radnog medija, obično plina ili pare. Prema principu rada razlikujemo volumetrijske i dinamičke kompresore, pri čemu potonji nalaze primjenu u zrakoplovstvu. Drugim imenom, turbokompresori gibanjem elemenata rotora (lopatica) generiraju silu koja uzrokuje ubrzanje fluida, čime u statoru dolazi do pretvorbe kinetičke energije fluida u potencijalnu energiju tlaka.

Turbokompresori su posebno korisni u plinskoturbinskim sustavima gdje nisu traženi iznimno visoki tlakovi, ali postoji potreba za velikim masenim protocima. Dijelimo ih na aksijalne i centrifugalne (radijalne).

Kod aksijalnih turbokompresora radni medij struji paralelno s glavnim vratilom, tj. s osi rotacije, dok centrifugalni odnosno radijalni turbokompresori imaju izlaz radnog medija pod pravim kutem s obzirom na os vratila. Centrifugalni turbokompresori omogućuju više kompresijske omjere po stupnju, koji kod zrakoplovnih primjena dostižu do 8:1, međutim imaju slabiji stupanj djelovanja, od oko 80-85%. Izvode se kao jednostupanjski ili višestupanjski.

Razlike između ta dva tipa turbokompresora su sljedeće:

- aksijalni se isključivo izvode kao višestupanjski, dok kod centrifugalnih to ne mora biti slučaj. Razlog tomu je niži omjer kompresije po stupnju, tj. svaki stupanj tek malo poveća tlak zraka.
- viši stupanj djelovanja kod aksijalnih turbokompresora,
- poprečni presjek veći kod centrifugalnih turbokompresora, što znači da aksijalni turbokompresori zauzimaju manje prostora.



Slika 2.1.1: Shema jednog stupnja aksijalnog turbokompresora s trokutima brzina na ulazu i izlazu iz rotora

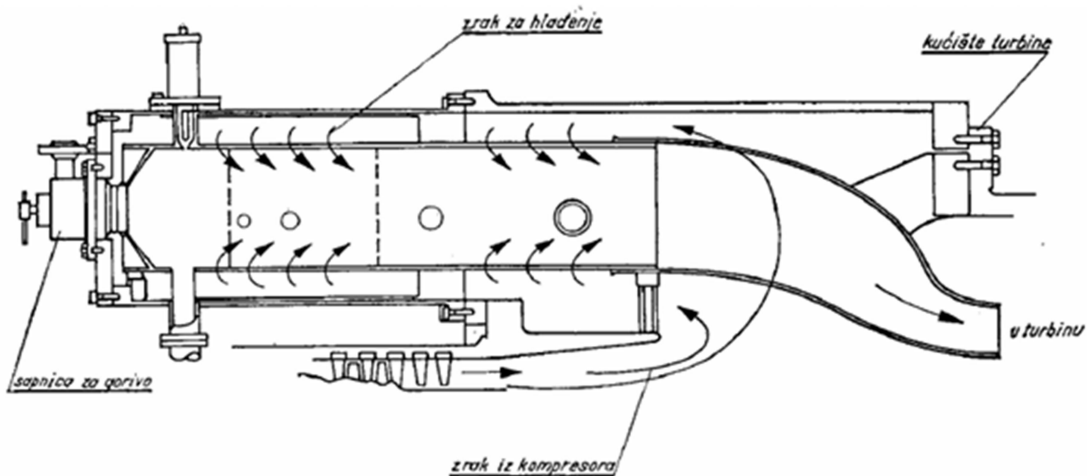
Na Slici 2.1.2. prikazana je shema stupnja aksijalnog turbokompresora gdje vidimo da su statorske lopatice vezane za kućište, a rotorske za rotor. Pritom je rotoru cilj ubrzati radni medij, dok stator troši kinetičku energiju kako bi dao veći tlak radnog medija.

Zbog velikog broja stupnjeva, kod aksijalnih se turbokompresora koristi isto tako velik broj statorskih i rotorskih lopatica što kompletnu napravu čini vrlo zahtjevnom za projektiranje,

kao i za proizvodnju i pogon. Sukladno tome, i njihovo je održavanje složeno. Međutim, kod strojeva sa snagom koja prelazi iznos od nekoliko MW, aksijalni turbokompresori predstavljaju prvi izbor, posebno kod velikih zrakoplova i motora velike snage.

Također razlikujemo kompresore visokog i niskog tlaka. Potonjima ventilator na ulazu motora “šalje” zrak na lopatice, pri čemu dolazi do povećanja tlaka, temperature i unutarnje energije tog zraka. Niskotlačni kompresori su vratilom povezani s niskotlačnom turbinom smještenom u stražnjem dijelu motora. Kod visokotlačnih kompresora rotorske lopatice guraju zrak na statorske lopatice, pri čemu se unutar više stupnjeva kompresije osigurava veća efikasnost nego kod NT kompresora.

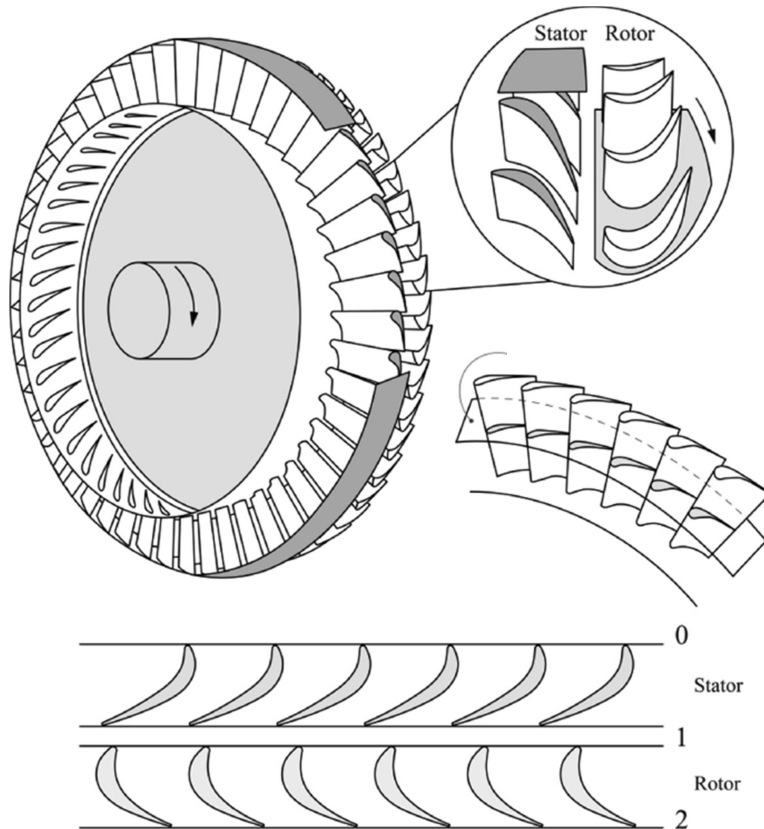
Jedan od osnovnih dijelova plinskoturbinskog postrojenja je i **komora izgaranja** (prikazana na Slici 2.1.3.), u koju ulazi stlačeni zrak iz kompresora, gdje s gorivom stvara gorivu smjesu koja naposljetku izgara. Da bi taj proces bio učinkovit, komora izgaranja mora zadovoljiti određene uvjete: omogućiti povoljan okoliš za izgaranje, osigurati potpuno sagorijevanje gorive smjese, ohladiti vruće plinove izgaranja na temperaturu koju turbinske lopatice mogu izdržati u radnim uvjetima, te oslobođenu toplinsku energiju predati turbini. Po izlasku iz komore, goriva smjesa se miješa s hladnijim zrakom, spuštajući temperaturu na odgovarajuću vrijednost.



Slika 2.1.3: Komora izgaranja

**Turbina** je energetski stroj s kontinuiranim protokom radnog fluida kroz sustav statorskih i rotorskih lopatica koji pretvara potencijalnu ili toplinsku energiju toka fluida u kinetičku energiju te dalje vrtnjom rotora u mehanički rad [4].

Ispušni plinovi koji izlaze iz komore izgaranja odlaze u turbinski dio koji se sastoji od visokotlačne i niskotlačne turbine. Prvi dio se odnosi na visokotlačnu turbinu, u koju ulaze vrući plinovi koji su produkt komore izgaranja. S obzirom da je vratilom vezana za kompresor, visokotlačna turbina pomoću lopatica na sebe preuzima dio energije ispušnih plinova, te istu koristi za pokretanje visokotlačnog kompresora. Nakon što napuste visokotlačnu turbinu, ispušni plinovi odlaze u niskotlačnu turbinu i pokreću je. LPT (*eng. low pressure turbine*), tj. niskotlačna turbina ima zadaću pokretanja niskotlačnog kompresora i ventilatora na prednjem dijelu motora koji stvara najveći dio potiska. Nakon što ventilator uvuče zrak koji se zatim komprimira i kompresorom odvede u komoru, proces se ponavlja. Na Slici 2.1.4. prikazan je primjer aksijalne turbine:

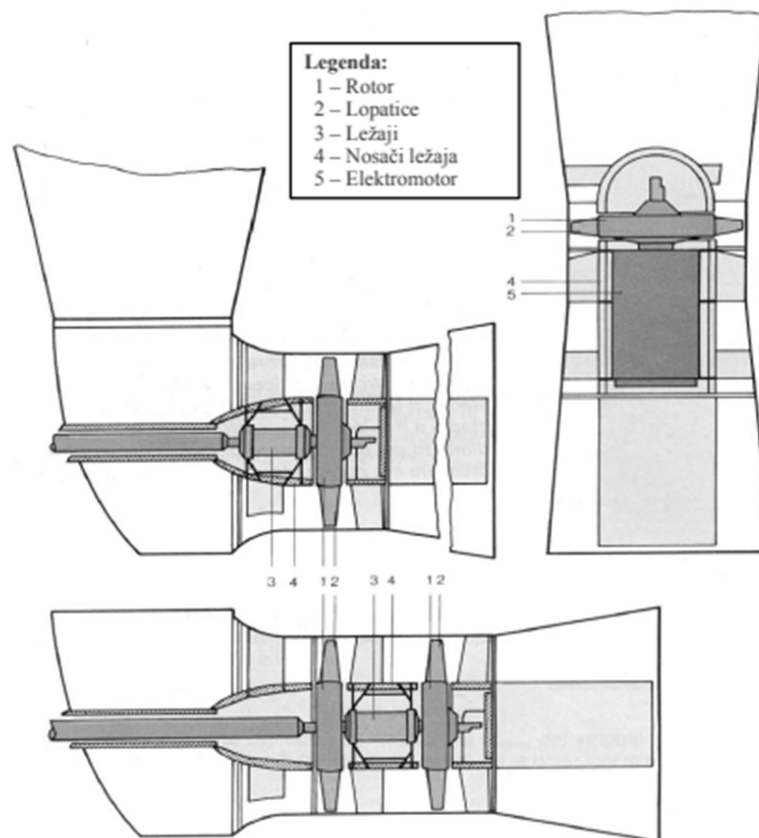


Slika 2.1.2: Aksijalna turbina

### 2.1.2. Konstrukcijski elementi izvan jezgre motora

**Usisnik zraka** je dio konstrukcije motora zadužen za omogućavanje dovoda stabilne struje zraka iz okoliša. Razlikujemo podzvučne i nadzvučne usisnike. Sastoji se od aerodinamički oblikovanog otvora koji ima zadaću stvaranja što manjeg otpora i remećenja strujanja zraka. Kod nadzvučnih zrakoplova zahtijevaju složeniju konstrukciju koja omogućuje smanjenje brzine s nadzvučne na podzvučnu.

**Ventilator** je stroj koji se nalazi u prednjem dijelu motora, a zadaća mu je da plinu povećava kinetičku energiju kako bi isti mogao svladati gubitke strujanja u cjevovodu pri nekom zadanom protoku. Sastoji se od dva dijela, statora tj. kućišta i rotora koji može biti radijalne ili aksijalne izvedbe. Djeluje s vrlo malim omjerom tlakova, sa zanemarivom promjenom gustoće, te se kompresija kod njih računa kao izohorna. Može biti jednostruk ili dvostruk. Kod turboventilatorskih motora, ventilatori su zaduženi za osiguravanje strujanja zraka između kućišta plinske turbine i kućišta cijelog motora, a neke od izvedbi aksijalnih ventilatora prikazuje Slika 2.1.5.:

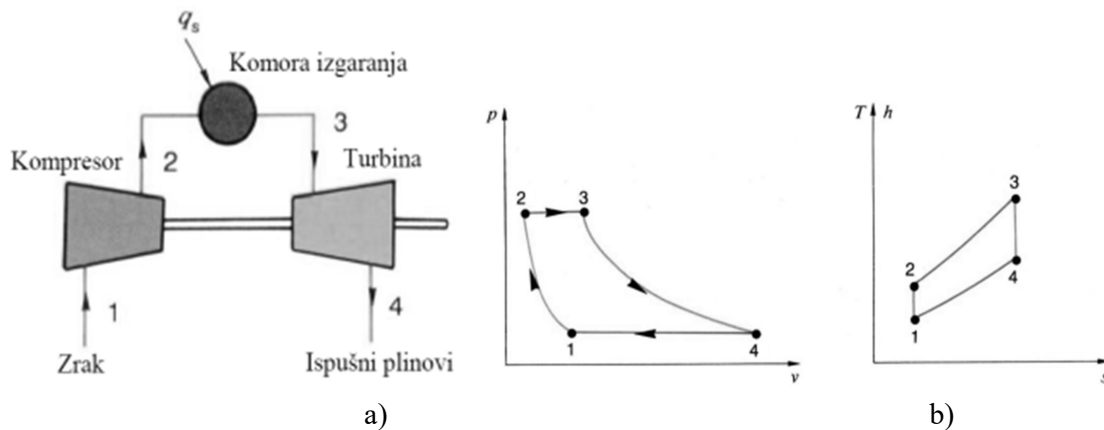


Slika 2.1.3.: Različite izvedbe aksijalnih ventilatora

**Mlaznica** je dio motora specifičnog oblika kojem je svojstvena mogućnost smanjenja tlaka uz istovremenu veliku izlaznu brzinu, čime se dobiva veliki potisni mlaz. Nalazi se iza turbine, na kraju motora, odakle izbacuje ispušne plinove u okoliš.

## 2.2. Idealni i realni (stvarni) procesi plinske turbine

Jouleov, odnosno Braytonov desnokretni kružni proces je temeljna ideja funkcioniranja plinskoturbinskog postrojenja. Odvija se između dvije adijabate koje uključuju kompresiju i ekspanziju radnog medija, te dvije izobare pri kojima se dovodi i odvodi toplina. Kako bismo si približili izgled tog procesa u praktičnom obliku, adijabate (izentrope) ćemo zamijeniti kompresorom i turbinom, a izobarno dovođenje topline komorom izgaranja. Izobarni izmjenjivač topline ćemo smatrati rashladnim spremnikom kojeg će predstavljati okoliš. Tako složen sustav predstavlja nam plinsku turbinu prikazanu na Slici 2.2.1. a).



Slika 2.2.1.: a) Prikaz plinske turbine, b) Jouleov (Braytonov) idealni proces u pV-, tj. Ts dijagramu

### 2.2.1. Idealni Braytonov proces

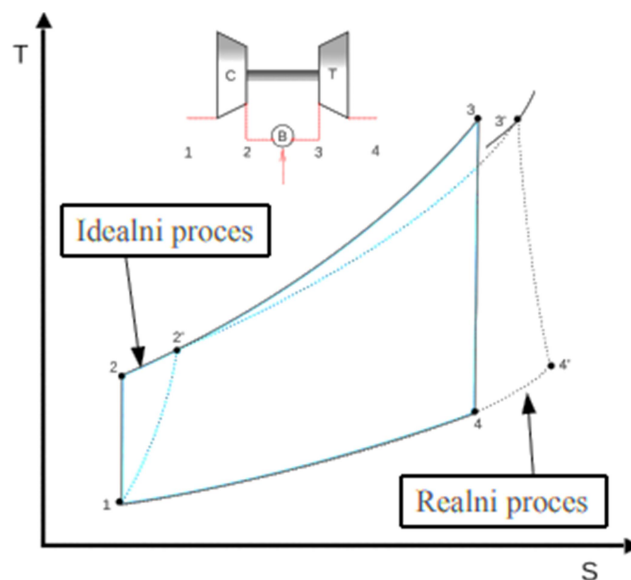
Na Slici 2.2.1. b) prikazan je idealni Braytonov proces, a njegov opis po fazama je sljedeći:

- 1-2: atmosferski zrak stanja  $p_1T_1$  se usisava u kompresor, iza čega slijedi adijabatska (izentropska) kompresija plina do stanja  $p_2T_2$
- 2-3: komprimirani zrak ulazi u komoru izgaranja i pri konstantnom tlaku mu se dodaje toplina izgaranjem goriva, pri čemu plinovima izgaranja raste volumen
- 3-4: zrak stanja  $p_3T_3$  ulazi u turbinu u kojoj dolazi do adijabatske ekspanzije do stanja  $p_4T_4$
- 4-1: zrak stanja  $p_4T_4$  pri konstantnom tlaku predaje toplinu rashladnom spremniku, te dovodi radni medij do početnog stanja  $p_1T_1$

U ovom se slučaju za radni medij uzima idealni plin, odnosno zrak za koji se pretpostavlja da je termodinamički idealan.

### 2.2.2. Stvarni Braytonov proces

U praksi ne možemo koristiti adijabatske promjene stanja, pa ih zamjenjujemo politropskim. Kod politrope vrijede isti odnosi između temperature, tlakova i volumena kao i kod adijabate, samo se umjesto eksponenta adijabate  $\kappa$  uvrštava eksponent politrope  $n$  [5]. Stoga nam stvarni proces kod plinske turbine u odnosu na idealni izgleda kao što je prikazano na Slici 2.2.2.:

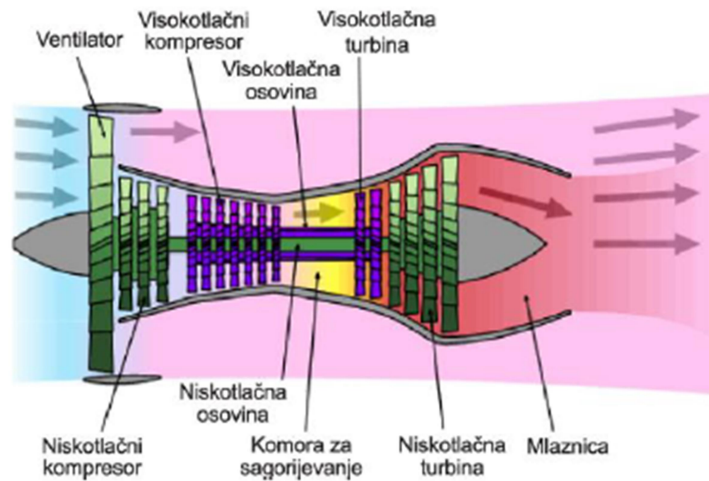


Slika 2.2.2: Usporedba stvarnog i realnog Braytonovog procesa [2]



Kad govorimo o razlikama između realnog i idealnog procesa, uglavnom se referiramo na gubitke, kojih u idealnom slučaju nema. U stvarnom slučaju, međutim, gubici su postojeći. Tako na primjer kod kompresije (na Slici 2.2.2. označeno linijom tj. politropom 1-2') vidimo da stupanj djelovanja turbokompresora uzrokuje promjenu iz adijabate u politropu. To zapravo znači da će turbokompresor, kao potrošač mehaničke energije, u realnom slučaju potrošiti više energije zbog gubitaka poput pretvorbe mehaničkog rada u toplinsku energiju, porasta entropije i izlazne temperature, gubitaka usisa itd. Nadalje, kod komore izgaranja (Slika 2.2.2., 2'-3') u stvarnom procesu dolazi do pada tlaka uslijed otpora strujanja zraka, pri čemu nastaju gubici topline i smanjuje se iskoristivost izgaranja. Isto tako, kod politropske ekspanzije (na slici označeno s 3'-4') uočavamo gubitke na turbini, koji slijede iz stupnja djelovanja turbine, a neki od njih su: gubici strujanja, vrtloženje radnog medija, toplinski gubici prema kućištu itd. U obzir također uzimamo i gubitke ispuha gdje također postoji pad tlaka.

### 2.3. Princip rada turboventilatorskih motora

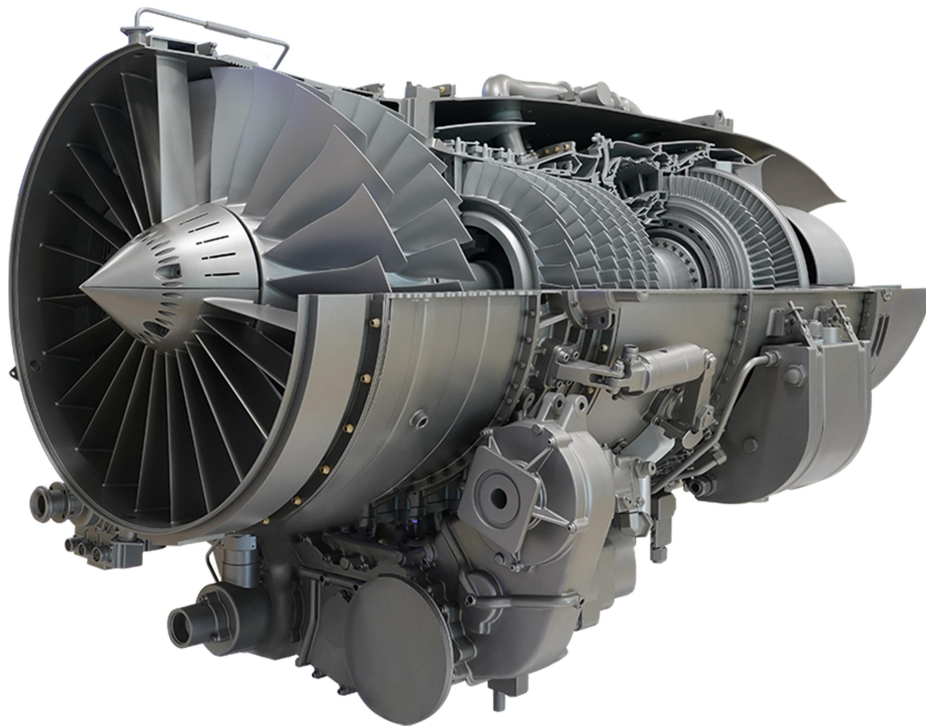


2.3.1: Presjek turboventilatorskog motora s jednostrukim ventilatorom

Turboventilatorski ili *turbofan* motori svoju posebnost duguju ventilatoru koji se nalazi u prednjem dijelu motora, a čija je zadaća osigurati ostvarivanje potisne sile. To se postiže na dva načina. Prvo, jedan dio zraka koji ulazi u motor, ventilator odvodi između kućišta plinske turbine i kućišta cijelog motora, pri čemu se osigurava strujanje zraka kroz mlaznicu. Na taj se način dobiva oko 80% ukupne potisne sile. Preostalih 20% se dobiva izbacivanjem dimnih plinova iz plinske turbine kroz mlaznicu.

Omjer količine zraka usisanog kroz ventilator koji prolazi izvan jezgre i zraka koji prolazi kroz jezgru predstavlja veličina koja se zove bypass omjer (BPR). Turboventilatorski motori današnjice ističu se visokom učinkovitošću potrošnje goriva, pa su tako na podzvučnim brzinama i s niskim BPR-om svejedno efikasniji od osnovnih turboblaznih motora jer koriste znatno manju količinu goriva. Presjek jednog turboventilatorskog motora s jednostrukim ventilatorom vidimo na Slici 2.3.1., dok nam Slika 2.3.2. predočava 3D model turboventilatorskog motora s dvostrukim ventilatorom.

Primjenjuju se u vojnom zrakoplovstvu kod novijih izvedbi zrakoplova, uz razliku što se borbene zrakoplove dodatno oprema komorama za naknadno izgaranje što stvara dodatni potisak pri djelovanju. Namjenu također nalaze i kod putničkih zrakoplova kao što su npr. Boeing 747 i Airbus A380, te kod velikih zrakoplova specijalne namjene (Tupoljev, Iljušin i sl.).



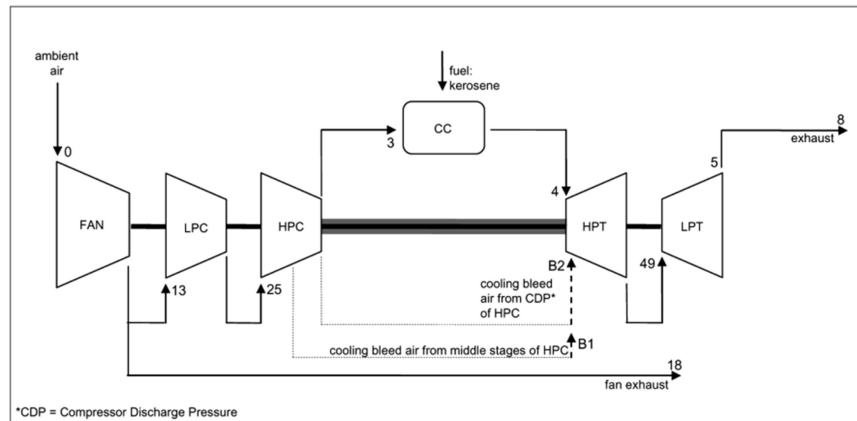
2.3.2: Turboventilatorski motor

### 3. PRORAČUN TURBOVENTILATORSKIH MOTORA

U zadatku su zadana tri turboventilatorska motora za koje su izrađeni proračuni svih komponenti za koje su zadani ulazni podaci prikazani u tablicama. Proračun veličina kao što su gustoća, specifična entalpija, specifična entropija i specifična eksergija izrađen je pomoću programa NIST Refprop, s uvjetima okoline  $p = 1 \text{ bar}$  i  $T = 25^\circ\text{C}$  (298 K).

#### 3.1. Ulazni podaci svih pojedinih motora i njihove sheme

##### Prvi turboventilatorski motor



Slika 3.1.1.: Shema prvog turboventilatorskog motora

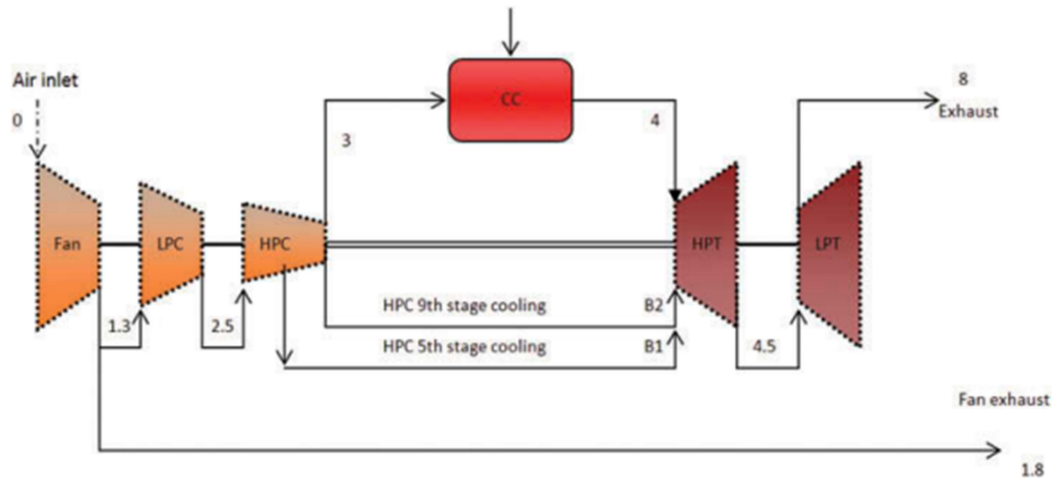
Slika 3.1.1. prikazuje zadani turboventilatorski motor, Tablica 1. njegove ulazne podatke.

ZADANO					Air - Pseudo Pure Fluid			
Radna točka	T (K)	T (°C)	p (bar)	m (kg/s)	rho (kg/m <sup>3</sup> )	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	ex (kJ/kg)
0	306.50	33.35	1.013	679.184	1.1517	432.84	3.9084	1.221
13	360.00	86.85	1.724	119.856	1.6682	486.67	3.9176	52.292
18	360.00	86.85	1.724	559.328	1.6682	486.67	3.9176	52.292
25	395.60	122.45	2.248	119.856	1.9789	522.64	3.9367	82.575
B1	707.80	434.65	13.376	3.178	6.5514	848.31	4.0286	380.840
B2	865.99	592.84	28.7	3.178	11.4330	1022.60	4.0300	554.720
3	865.99	592.84	28.7	113.500	11.4330	1022.60	4.0300	554.720
4	1510.00	1236.85	28.406	115.700	6.5101	1776.60	4.6816	1114.5
49	1079.40	806.25	6.322	122.056	2.0366	1264.00	4.7154	591.790
5	788.30	515.15	1.558	122.056	0.6882	935.58	4.7638	248.930
8	787.80	514.65	1.551	122.056	0.6855	935.04	4.7644	248.200
Gorivo	Hd (kJ/kg)	46000	m (kg/s)	2.2	ex (kJ/kg)	49220		

Tablica 1.: Zadani ulazni podaci prvog turboventilatorskog motora

## Drugi turboventilatorski motor

Slika 3.1.2. i Tablica 2. u nastavku prikazuju shemu i ulazne podatke zadanog drugog turboventilatorskog motora:

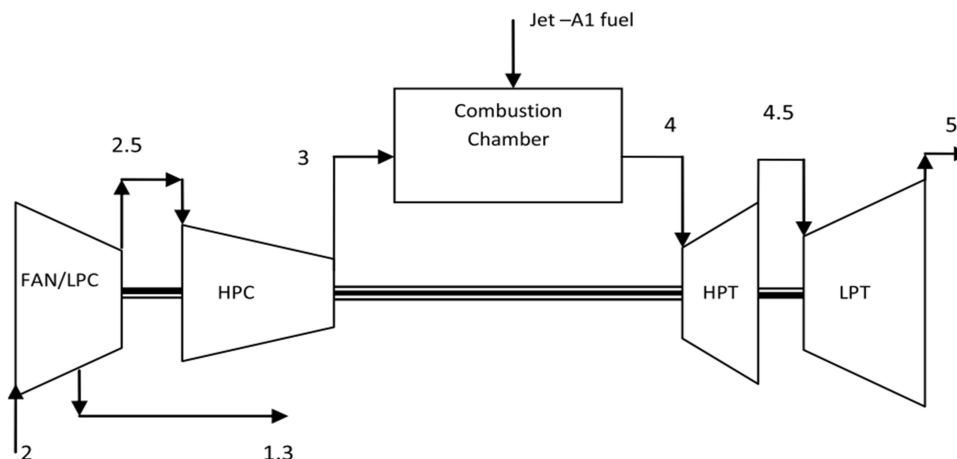


Slika 3.1.2.: Shema drugog zadanog turboventilatorskog motora

ZADANO					Air - Pseudo Pure Fluid			
Radna točka	T (K)	T (°C)	p (bar)	m (kg/s)	rho (kg/m <sup>3</sup> )	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	ex (kJ/kg)
Fan inlet 0	288	14.85	1.004	361	1.215	414.23	3.848	0.519
Fan outlet - LPC	337	63.85	1.636	59.2	1.691	463.46	3.866	44.461
Fan outlet - engine out	337	63.85	1.595	301.8	1.649	463.46	3.873	42.290
LPC inlet 2.1	314	40.85	1.305	59.2	1.448	440.33	3.860	23.184
LPC outlet 2.5	445	171.85	3.709	59.2	2.901	572.8	3.912	140.000
HPC inlet	445	171.85	3.709	59.2	2.901	572.8	3.912	140.000
B1	688.71	415.56	17	1.18	8.546	827.79	3.930	389.710
B2	872	598.85	33.38	1.18	13.186	1029.5	3.994	572.330
CC inlet	872	598.85	33.38	56.84	13.186	1029.5	3.994	572.330
HPT inlet	1624	1350.85	31.715	58.1	6.758	1915.7	4.739	1236.600
HPT outlet - LPT inlet	1241	967.85	8.72	60.46	2.442	1453	4.786	759.740
8	865.51	592.36	1.9	60.46	0.764	1020.9	4.810	320.460
Gorivo	Hd (kJ/kg)	46000	m (kg/s)	1.26	ex (kJ/kg)	49220		

Tablica 2.: Zadani ulazni podaci drugog turboventilatorskog motora

### Treći turboventilatorski motor



Slika 3.1.3.: Shema trećeg turboventilatorskog motora

ZADANO					Air - Pseudo Pure Fluid			
Radna točka	T (K)	T (°C)	p (bar)	m (kg/s)	rho (kg/m <sup>3</sup> )	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	ex (kJ/kg)
Fan inlet 2	288.15	15	1.0135	142.7	1.2258	414.37	3.8461	1.3199
Fan outlet 1.3	361	87.85	1.93	74.74	1.8623	487.65	3.8879	62.122
LPC inlet 1.3	361	87.85	1.93	67.96	1.8623	487.65	3.8879	62.122
LPC outlet 2.5	453	179.85	4.136	67.96	3.177	580.95	3.8992	152.07
HPC inlet	453	179.85	4.136	67.96	3.177	580.95	3.8992	152.07
HPC outlet	700	426.85	16.065	67.96	7.9482	839.93	3.9638	391.77
CC inlet	700	426.85	16.065	67.96	7.9482	839.93	3.9638	391.77
CC outlet	1211	937.85	15.17	69	4.0494	1523.4	4.6819	861.12
HPT inlet	1211	937.85	15.17	69	4.3461	1418.1	4.5981	780.87
HPT outlet	967	693.85	5.67	69	2.039	1135.2	4.6206	491.22
LPT inlet	967	693.85	5.67	69	2.039	1135.2	4.6206	491.22
LPT outlet 5	743.15	470	1.8	69	0.84326	886.34	4.6579	231.23
Gorivo	Hd (kJ/kg)	46000	m (kg/s)	1.04	ex (kJ/kg)	49220		

Tablica 3.: Zadani ulazni podaci trećeg turboventilatorskog motora

Slika 3.1.3. i Tablica 3. prikazuju shemu i ulazne podatke trećeg zadanog turboventilatorskog motora. Sve vrijednosti istaknute crvenom bojom su ispravljene u odnosu na zadane podatke.

S ovim podacima izrađen je proračun svih komponenti ovih turboventilatorskih motora, što je objašnjeno u nastavku.

### 3.2. Proračun

Kao što je već navedeno, zadani su ulazni podaci za tlak, temperaturu i maseni protok svakog dijela turboventilatorskog motora, te su potom za svaki od tri motora programski izračunate vrijednosti gustoće, specifične entalpije, specifične entropije i specifične eksergije. Te vrijednosti nam koriste kako bismo mogli provesti energijsku i eksergijsku analizu.

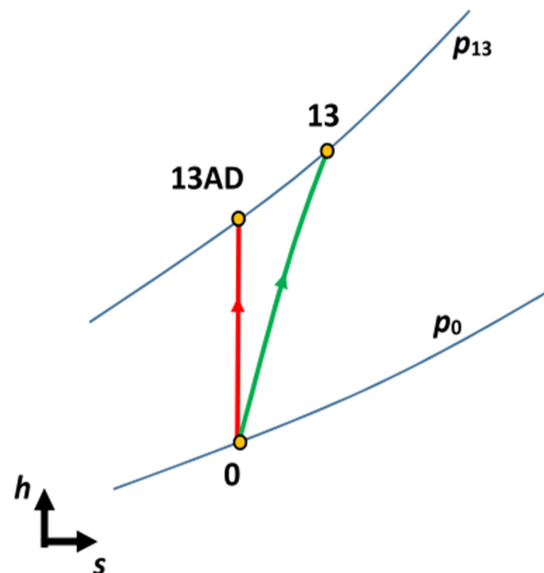
#### 3.2.1. Proračun energije

Energijski proračun se temelji na prvom zakonu termodinamike koji se odnosi na očuvanje energije, a glasi: dovedena toplina  $Q$  služi dijelom za povećanje unutarnje energije  $U_2-U_1$ , a dijelom za vršenje mehaničkog rada  $L$  [5], odnosno:

$$Q = U_2 - U_1 + L \quad (1)$$

Kod svakog dijela motora zanima nas njegova energijska iskoristivost. Da bismo to saznali, potrebno je prvo izračunati snage (idealnu i stvarnu) i energijske gubitke. Taj dio prikazan je po komponentama:

1) Ventilator i niskotlačni kompresor



Slika 3.2.1.: Prikaz idealne (adijabatske) i stvarne (politropske) kompresije zraka kod ventilatora u h/s dijagramu

Sa Slike 3.2.1. vidimo da se zrak početnog stanja  $p_0T_0$  komprimira do stanja na izlazu iz ventilatora,  $p_{13}T_{13}$ . Stoga, slijedeći te oznake, za ventilator vrijede sljedeće jednadžbe:

**Idealna snaga:**

$$P_{AD} = \dot{m}_0 \cdot (h_{13AD} - h_0) \quad (2)$$

**Stvarna snaga** je u [6] definirana kao:

$$P_{PT} = \dot{m}_0 \cdot (h_{13} - h_0) \quad (3)$$

**Energijski gubici:**

$$En_g = P_{PT} - P_{AD} \quad (4)$$

**Energijska iskoristivost:**

$$\eta_{en} = \frac{P_{AD}}{P_{PT}} \cdot 100\% \quad (5)$$

Isti ovaj princip korišten je i kod proračuna za niskotlačni kompresor, a iste jednadžbe vrijede za obe komponente sva tri analizirana motora.

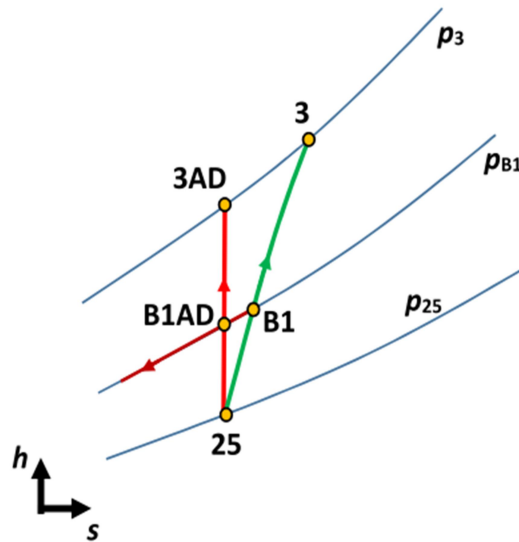
## 2) Visokotlačni kompresor

Ovdje vrijedi jednaka logika kod izračuna snaga, gubitaka i energijske iskoristivosti kao kod prethodne dvije komponente, ali moramo uzeti u obzir i zrak koji se koristi za hlađenje (npr. kod klimatizacije, kod odzračivanja hidrauličkog sustava, kod spremnika s vodom itd.). Na koji način ćemo izračunati snage kod VT kompresora, približit će nam primjer procesa prikazan u h/s dijagramu na Slici 3.2.2. Vidimo da zrak stanja  $p_{25}T_{25}$  ulazi u kompresor, pa ćemo to stanje u jednadžbama označiti kao ulaz, a sukladno tome, stanje  $p_3T_3$  kao izlaz. Potrebno je komprimirati zrak na temperaturu stanja  $p_3T_3$ , tj. do stanja u radnoj točki na ulazu u komoru izgaranja.

U procesu politropske kompresije (odnosno adijabatske u idealnom slučaju), kompresor dovodi zrak početnog stanja do stanja  $p_{B1}T_{B1}$ , te jedan njegov dio odlazi u vod za odzračivanje (tj. izbacuje se) [7], a drugi dio se nastavlja komprimirati do stanja  $p_3T_3$ .

**Idealna snaga:**

$$P_{AD} = \dot{m}_{25} \cdot (h_{B1AD} - h_{25}) + (\dot{m}_{25} - \dot{m}_{B1}) \cdot (h_{3AD} - h_{B1AD}) \quad (6)$$



Slika 3.2.2.: Prikaz idealne (adijabatske) i stvarne (politropske) kompresije kod visokotlačnog kompresora u h/s dijagramu

Nastavno na Sliku 3.2.2., za izračun stvarne snage vrijedi sljedeće:

**Stvarna snaga:**

$$P_{PT} = \dot{m}_1 \cdot (h_{B1} - h_{25}) + (\dot{m}_{25} - \dot{m}_{B1}) \cdot (h_3 - h_{B1}) \quad (7)$$

Jednadžbe za izračun energijskih gubitaka i energijske iskoristivosti su jednake kao kod proračuna ventilatora i niskotlačnog kompresora, te uz gore navedene jednadžbe vrijede kod



### 3) Komora izgaranja

U ovaj dio motora ulazi zrak stanja  $p_3T_3$  (gledano sa Slike 3.2.1.), te mu se dodaje gorivo donje ogrjevne moći od 46 MJ. Kod prethodnih smo komponenti računali stvarnu i idealnu snagu, a ovdje umjesto njih slijede:

#### **Toplina dovedena gorivom:**

$$Q_{dov} = Hd_{goriva} \cdot \dot{m}_{goriva} \quad (8)$$

gdje  $Hd$  predstavlja donju ogrjevnu moć goriva, a maseni protok goriva predstavlja razliku masenih protoka na izlazu i ulazu u komoru izgaranja:

$$\dot{m}_{gorivo} = \dot{m}_{IZ} - \dot{m}_{UL} \quad (9)$$

**Toplina predana zraku** je u [8] definirana kao:

$$Q_{odv} = \dot{m}_{IZ} \cdot (h_{IZ} - h_{UL}) \quad (10)$$

#### **Energijski gubici:**

$$En_g = Q_{dov} - Q_{odv} \quad (11)$$

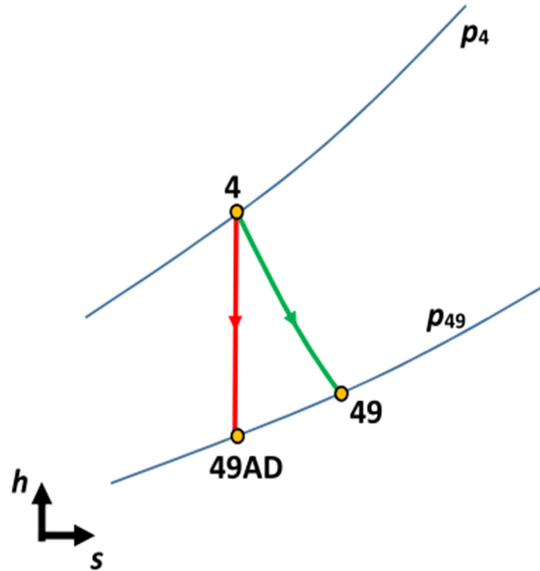
#### **Energijska iskoristivost:**

$$\eta_{en} = \frac{Q_{odv}}{Q_{dov}} \cdot 100\% \quad (12)$$

Isti princip proračuna komora izgaranja korišten je kod sva tri motora.

#### 4) Turbine

Na Slici 3.2.3. je prikazana ekspanzija zraka od stanja  $p_4T_4$  do stanja  $p_{49}T_{49}$ , a te oznake stanja ćemo upotrebljavati i kod jednažbi.



Slika 3.2.3.: Politropska i adijabatska ekspanzija zraka u visokotlačnoj turbini u h/s dijagramu

Da bismo izračunali energijsku iskoristivost VT turbine, potrebne su nam, kao i kod turbokompresora, stvarna i idealna snaga, a njih računamo na sljedeći način:

#### **Idealna snaga:**

$$P_{AD} = (\dot{m}_4 + \dot{m}_{B1+B2}) \cdot (h_4 - h_{49AD}) \quad (13)$$

#### **Stvarna snaga:**

$$P_{PT} = (\dot{m}_4 + \dot{m}_{B1+B2}) \cdot (h_4 - h_{49}) \quad (14)$$

pri čemu su B1 i B2 uključeni pri ekspanziji na VT turbinu.

**Energijski gubici:**

$$En_g = P_{AD} - P_{PT} \quad (15)$$

**Energijska iskoristivost:**

$$\eta_{en} = \frac{P_{PT}}{P_{AD}} \cdot 100\% \quad (16)$$

Za energijsku analizu niskotlačne turbine koriste se isti principi kao i za energijsku analizu visokotlačne turbine.

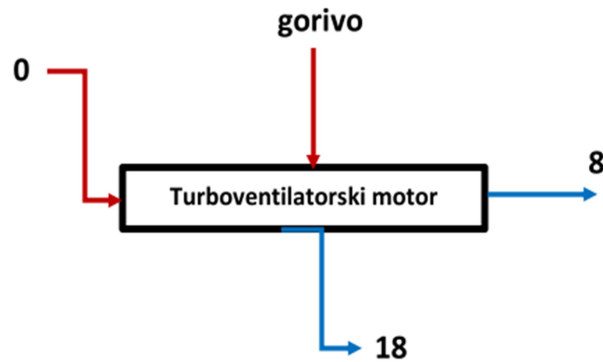
**5) Cijeli motor**

Prvenstveno treba izračunati korisnu snagu motora, što ćemo učiniti tako da zbrojimo realne snage turbina i njihovom zbroju oduzmemo realne snage svih ostalih komponenti (ventilatora i kompresora):

**Korisna snaga:**

$$P_{uk} = P_{PT} (LPT) + P_{PT} (HPT) - P_{PT} (HPC) - P_{PT} (LPC) - P_{PT} (FAN) \quad (17)$$

pri čemu je: LPT – niskotlačna turbina, HPT – visokotlačna turbina, HPC – visokotlačni kompresor, LPC – niskotlačni kompresor, FAN – ventilator.



Slika 3.2.4.: Prikaz ulaza i izlaza za cijeli motor

Na Slici 3.2.4. vidimo da su ulazi (0 i gorivo) označeni crvenom, a izlazi (8 i 18) plavom bojom. Iz toga slijedi:

**Energijski ulaz:**

$$En_{UL} = (\dot{m}_0 \cdot h_0) + (\dot{m}_{goriva} \cdot Hd_{goriva}) \quad (18)$$

**Energijski izlaz:**

$$En_{IZ} = (\dot{m}_{18} \cdot h_{18}) + (\dot{m}_8 \cdot h_8) \quad (19)$$

pri čemu se ovdje naznačeni indeks "18" odnosi na ispuh iz ventilatora, a indeks "8" na ispuh iz zadnje komponente motora, tj. niskotlačne turbine.

Pomoću ovih podataka lako možemo izračunati sljedeće bitne stavke:

**Energijski gubici cijelog motora:**

$$En_g = En_{UL} - En_{IZ} \quad (20)$$

### Energijska iskoristivost cijelog motora:

$$\eta_{en} = \frac{En_{IZ}}{En_{UL}} \cdot 100\% \quad (21)$$

Isto tako, važno je uzeti u obzir bilancu masa za bilo koji kontrolni volumen u stanju mirovanja, tj. voditi se logikom da je maseni protok na ulazu jednak onome na izlazu:

$$\sum \dot{m}_{UL} = \sum \dot{m}_{IZ} \quad (22)$$

Kako su svi procesi u turboventilatorskim motorima jednaki, tako i sve ove jednadžbe kod energijske analize vrijede za svaki od tri zadana turboventilatorska motora, ali za različite radne točke i različite radne parametre koji su za svaki motor prethodno prikazani u tablicama.

### 3.2.2. Proračun eksergije

Eksergiju, odnosno tehničku radnu moć, definiramo kao najveći rad koji možemo dobiti iz radne tvari koju trajno dobavljamo pri  $p = \text{const.}$ , njome vršimo rad i trajno je istiskujemo pri  $p_0 = \text{const.}$  [5]. Općeniti izraz za specifičnu eksergiju je u [9] definiran kao:

$$e = h_1 - h_0 - T_0 \cdot (s_1 - s_0) \quad (23)$$

Eksergijska analiza bazirana je na drugom zakonu termodinamike koji kaže da toplina ne može sama od sebe prijeći s hladnijeg na toplije tijelo, i to niti neposredno, niti posredno. To znači da se izmjena topline ne potpomaže nikakvom trajnom promjenom na drugim tijelima okoline [5].

Izračun eksergijske iskoristivosti prikazan je po komponentama u nastavku.

### 1) Ventilator i niskotlačni kompresor

Kod energijske smo analize ventilatora vidjeli da se zrak početnog stanja  $p_0T_0$  komprimira do stanja  $p_{13}T_{13}$  na izlazu iz ventilatora (vidljivo na Slici 3.2.1.). Iz toga slijedi:

#### **Eksergijski ulaz:**

$$Ex_{UL} = \dot{m}_0 \cdot ex_0 + P_{PT} \quad (24)$$

#### **Eksergijski izlaz:**

$$Ex_{IZ} = \dot{m}_{13} \cdot ex_{13} \quad (25)$$

#### **Eksergijski gubici:**

$$Ex_g = Ex_{UL} - Ex_{IZ} \quad (26)$$

#### **Eksergijska iskoristivost:**

$$\eta_{ex} = \left( \frac{(\dot{m}_{13} \cdot ex_{13}) - (\dot{m}_0 \cdot ex_0)}{P_{PT}} \right) \cdot 100\% \quad (27)$$

Kod eksergijske analize u obzir uzimamo samo realni, odnosno politropski proces, pri čemu je okolina za sve komponente definirana isto. U eksergijskom proračunu ostalih komponenti, osim kod onih kod kojih je naznačeno drugačije, vrijedi isti princip, ali se moraju uzeti u obzir radne točke ulaza i izlaza te konkretne komponente.

## 2) Visokotlačni kompresor

Kod ove komponente razlike u proračunu u odnosu na prethodne dvije su u izračunima eksergijskog izlaza i eksergijske iskoristivosti. To je zbog već spomenutog odzračivanja do kojeg dolazi kod visokotlačnog kompresora, pa jednažba za eksergijski izlaz ovdje glasi:

### Eksergijski izlaz:

$$Ex_{IZ} = (\dot{m}_{B1} \cdot ex_{B1}) + (\dot{m}_3 \cdot ex_3) \quad (28)$$

pri čemu nam oznaka "B<sub>1</sub>" predstavlja radnu točku stanja zraka koji se izbacuje iz visokotlačnog kompresora, a oznaka "3" označava stanje zraka na izlazu iz visokotlačnog kompresora, kao što je vidljivo na Slici 3.2.2.). Budući da smo te točke uzeli u obzir pri izračunu eksergijskog izlaza, one nam utječu i na eksergijsku iskoristivost koju računamo na sljedeći način:

### Eksergijska iskoristivost:

$$\eta_{ex} = \frac{(\dot{m}_{B1} \cdot ex_{B1} + \dot{m}_3 \cdot ex_3 - \dot{m}_{25} \cdot ex_{25})}{P_{PT}} \cdot 100\% \quad (29)$$

## 3) Komora izgaranja

U komoru izgaranja ulazi zrak stanja p<sub>3</sub>T<sub>3</sub> koji ekspandira do stanja p<sub>4</sub>T<sub>4</sub>. Zatim se dovodi gorivo koje se miješa sa zrakom, te se tako tvori goriva smjesa. Iz toga slijedi:

### Eksergijski ulaz:

$$Ex_{UL} = \dot{m}_3 \cdot ex_3 + \dot{m}_{goriva} \cdot ex_{goriva} \quad (30)$$

**Eksergijska iskoristivost:**

$$\eta_{ex} = \left( 1 - \frac{Ex_g}{(\dot{m}_3 \cdot ex_3) + (\dot{m}_4 \cdot ex_4) + (\dot{m}_{goriva} \cdot ex_{goriva})} \right) \cdot 100\% \quad (31)$$

Eksergijske gubitke komore izgaranja računamo po istom izrazu kao kod ventilatora i NT kompresora, a isto vrijedi i za izračun eksergijskog izlaza.

**4) Turbine**

U visokotlačnoj turbini ekspandira zrak stanja  $p_4 T_4$  do stanja  $p_{49} T_{49}$  (gledano sa Slike 3.2.3.). Pri ekspanziji se također uključuje i zrak koji je visokotlačni kompresor izbacio, pa iz toga slijedi:

**Eksergijski ulaz:**

$$Ex_{UL} = (\dot{m}_4 + \dot{m}_{B1+B2}) \cdot ex_4 \quad (32)$$

gdje nam se indeks “B1+B2” u ovom slučaju odnosi na zbroj masenih protoka zraka koji se u VT turbinu dovode iz kompresora.

**Eksergijski izlaz:**

$$Ex_{IZ} = (\dot{m}_{49} \cdot ex_{49}) + P_{PT} \quad (33)$$

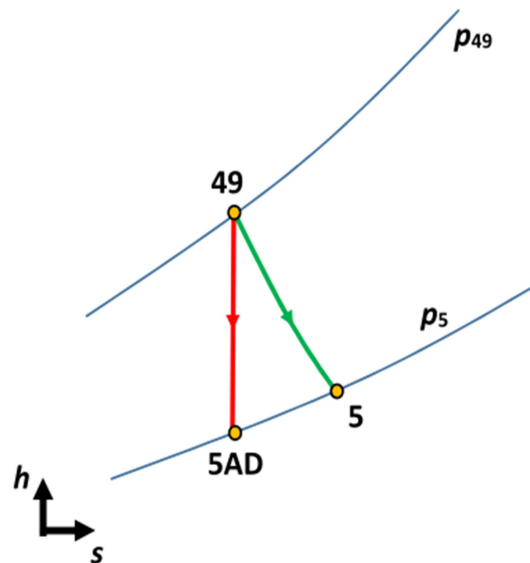
**Eksergijska iskoristivost:**

$$\eta_{ex} = \frac{P_{PT}}{((\dot{m}_4 + \dot{m}_{B1+B2}) \cdot ex_4) - (\dot{m}_{49} \cdot ex_{49})} \cdot 100\% \quad (34)$$



Kod ove komponente motora, izračun eksergijskog ulaza i eksergijskih gubitaka vrši se po izrazima jednakim kao kod ventilatora i niskotlačnog kompresora (tj. po izrazima 20 i 22).

Kod niskotlačne turbine u h/s dijagramu na Slici 3.2.5. vidimo da zrak stanja  $p_{49}T_{49}$  ekspandira do stanja  $p_5T_5$ .



Slika 3.2.5.: Prikaz politropske i adijabatske ekspanzije zraka kod NT turbine u h/s dijagramu

Ovdje za eksergijsku analizu vrijede isti principi kao kod visokotlačne turbine, uz iznimku eksergijskog ulaza koji se računa po izrazu:

**Eksergijski ulaz:**

$$Ex_{UL} = \dot{m}_{49} \cdot ex_{49} \quad (35)$$

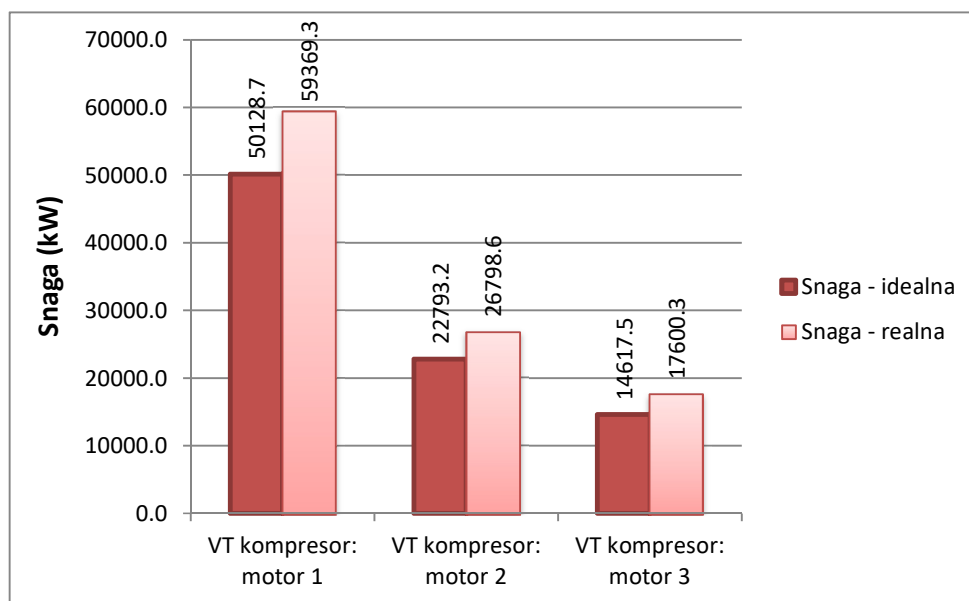
Svi principi u ovom poglavlju korišteni su za proračun sva tri zadana turboventilatorska motora, samo s različitim ulaznim podacima i različitim radnim parametrima već prikazanim u tablicama na početku ovog poglavlja.

## 4. REZULTATI DOBIVENI PRORAČUNOM

Po dobivanju rezultata iz prethodno navedenih jednadžbi, iste je potrebno usporediti i analizirati. S obzirom da se proračun temelji na energijskom i eksergijskom dijelu, rješenja će biti jednako grupirana.

### 4.1. Rezultati proračuna energije

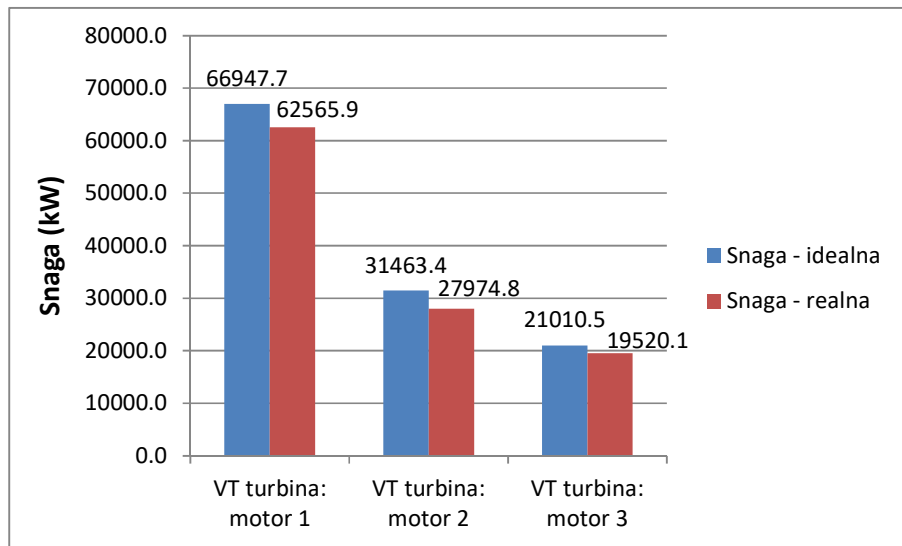
U prethodnom smo poglavlju kod jednadžbi za izračun idealne i stvarne snage uvidjeli da te dvije vrijednosti ovise o masenim protocima i razlikama entalpija. Nadalje, idealni ili adijabatski proces se odvija, kao što mu i ime kaže, u idealnim uvjetima. S obzirom da je takav proces nemoguće obaviti, potrebno je izračunati stvarnu snagu, po izrazu (3). Pogledajmo stoga usporedbu realnih i idealnih snaga visokotlačnih kompresora kod sva tri turboventilatorska motora na Slici 4.1.1. Kod turbokompresora se kompresija promatra između dva stanja mirovanja; na usisu u kompresor i na izlazu iz istog. Osnovna zadaća tog radnog stroja je povećati tlak radnom mediju, za što koristi mehaničku snagu. Nakon kompresije, zrak višeg tlaka se odvodi u spremnik gdje mu se smanjuje brzina do stanja mirovanja, tj. do zastoje točke na izlazu iz kompresora. S obzirom da u realnosti taj proces podrazumijeva razne gubitke, potrošit će se i veća snaga u odnosu na idealni proces, a upravo to i vidimo na sljedećem dijagramu.



Slika 4.1.1.: Snage potrebne za pogon VT kompresora zadanih motora

Gubici su i kod ostalih komponenti vrlo bitni jer su neizbježni u stvarnim procesima. Naime, zbog unutarnjih trenja u turbini [10] kod stvarnog procesa ekspanzije nemamo adijabatski nego politropski proces, a on se odvija uz porast entropije, kao što je vidljivo u podacima danim u Tablicama 1., 2. i 3.

Slika 4.1.2. prikazuje realne i idealne snage visokotlačnih turbina kod zadana tri turboventilatorska motora, gdje vidimo da su idealne snage veće od stvarnih.



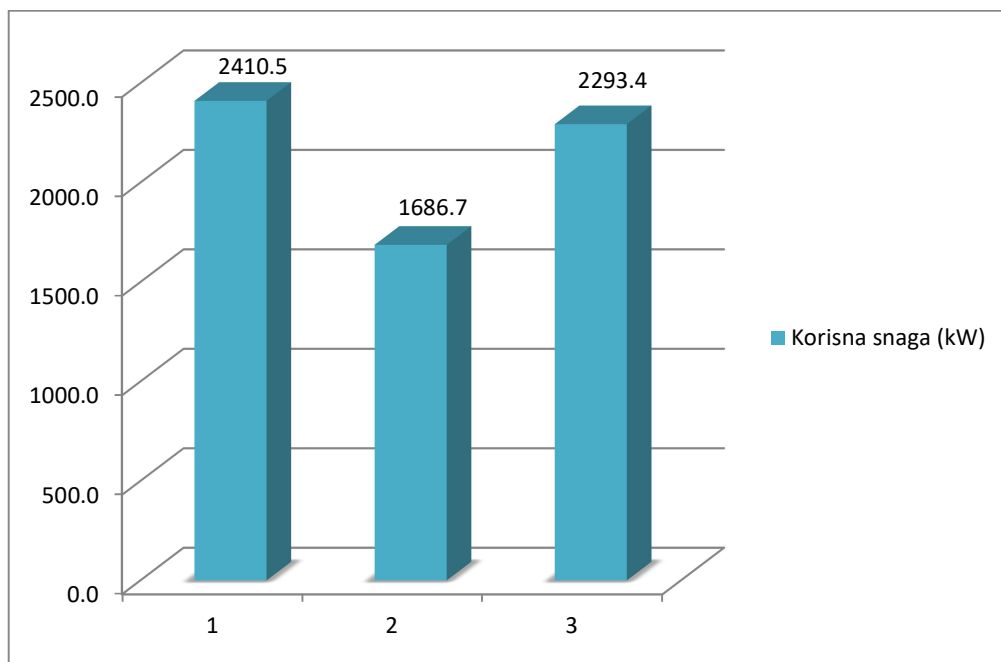
Slika 4.1.2.: Usporedba idealnih i realnih snaga kod visokotlačnih turbina tri različita turboventilatorska motora

Ako pogledamo vrijednosti ulaznih podataka na sve tri VT turbine, uočiti ćemo da su početni i krajnji tlak jednaki kod oba procesa, ali je zbog gubitaka porasla entropija kod politropskog procesa, a entalpijski je pad smanjen. Zato je dobivena stvarna snaga VT turbine manja od teorijske.

Kod plinskih turbina kompresori troše veliki dio snage proizvedene na turbini, pa je iskoristivost turbokompresora vrlo bitan parametar. Zbog toga sitne varijacije učinkovitosti kompresora i turbine mogu imati značajan utjecaj na cjelokupnu izvedbu [11].

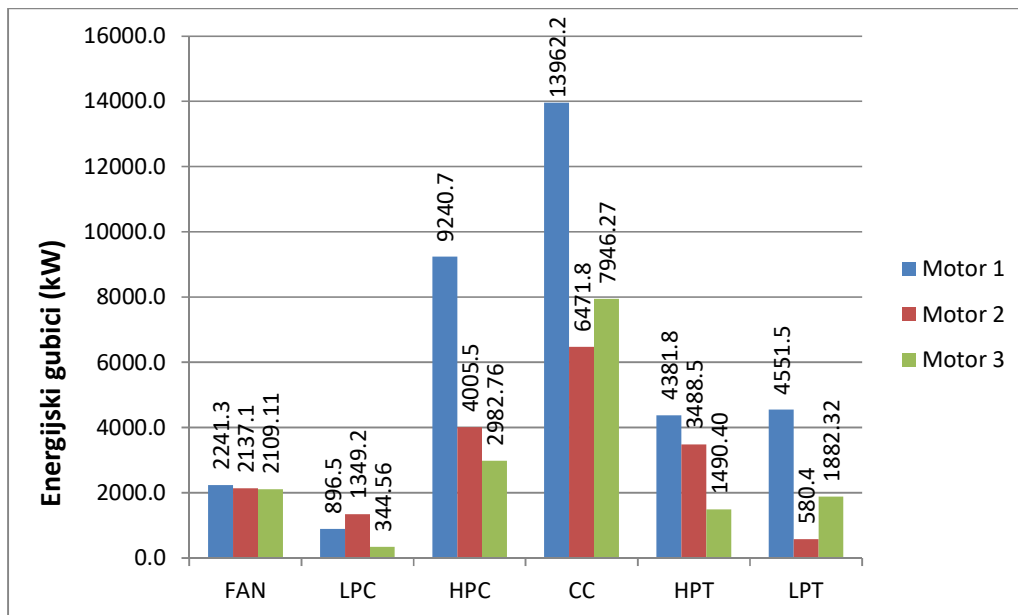
U izračun korisnih snaga ulaze sve stvarne snage svih komponenti motora izuzev komore izgaranja, kao što stoji u izrazu (17). U standardnim izvedbama plinskih turbina korisna snaga se troši na pogon bilo kojeg vanjskog potrošača, dok se kod turboventilatorskih motora korisna snaga troši samo na pokrivanje mehaničkih gubitaka motora.

Vidimo na Slici 4.1.3. da je korisna snaga najveća kod prvog turboventilatorskog motora, što znači da je kod njega potrebna veća snaga za pokrivanje mehaničkih gubitaka nego kod preostala dva motora.



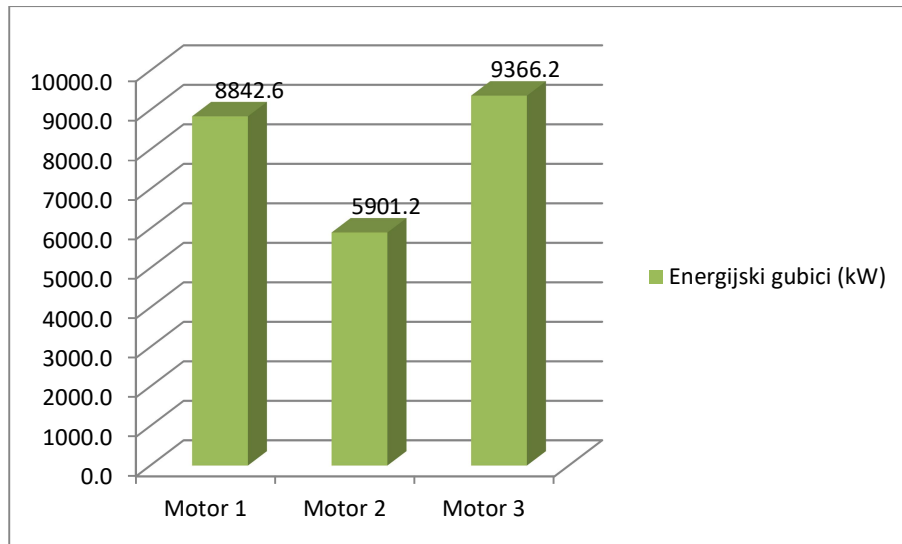
Slika 4.1.3.: Usporedba korisnih snaga analiziranih motora

Kako smo već utvrdili da su gubici neizostavni u ovakvim procesima, možemo pogledati i usporedbu energijskih gubitaka na svim komponentama sva tri motora na Slici 4.1.4. Vidimo da ventilator s najvećim gubicima pripada motoru 1, a da najmanje energijskih gubitaka imamo kod ventilatora motora 3. Niskotlačni kompresor s najvećim energijskim gubicima je onaj u sklopu motora 2, a najmanje gubitke broji kompresor motora 3. Što se tiče visokotlačnog kompresora, najmanje gubitke ima HPC na motoru 3, a najveće onaj motora 1. Kod komora izgaranja, najveće energijske gubitke ima komora izgaranja motora 1, a najmanje ona motora 2. Nadalje, visokotlačna turbina motora 1 ima najveće energijske gubitke, dok je najmanje energije izgubila ta komponenta motora 3. Konačno, kod LPT (niskotlačne turbine) najmanje energijske gubitke vidimo na motoru 2, a najveće na motoru 1.



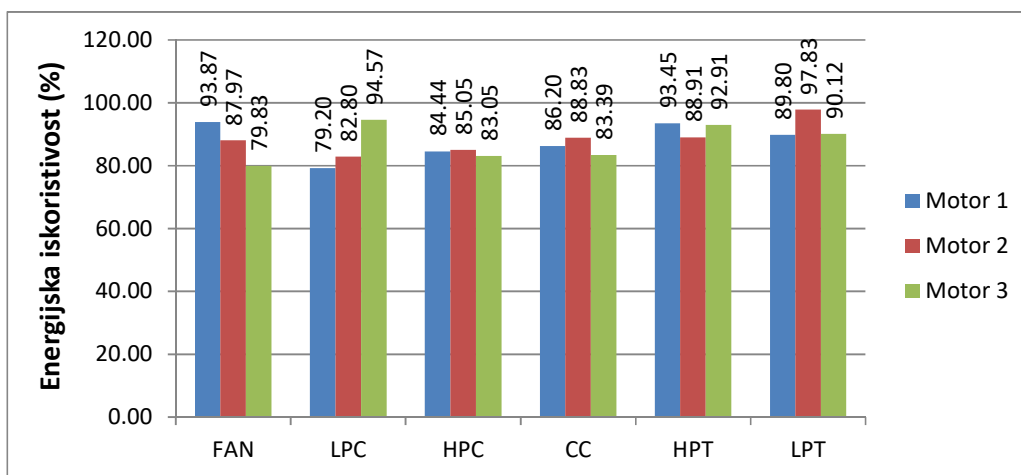
Slika 4.1.4.: Energijski gubici po komponentama motora

Što se tiče ukupnih energijskih gubitaka cijelog motora, najviše energije izgubio je motor 3, a najmanje motor 2, što je vidljivo na Slici 4.1.5. Energijski gubici prikazuju gubitke (tj. odnos dovedenih i odvedenih toplinskih tokova) u kontrolnom volumenu, neovisno o tome kakvo je stanje okoline u kojoj se taj kontrolni volumen nalazi [12].



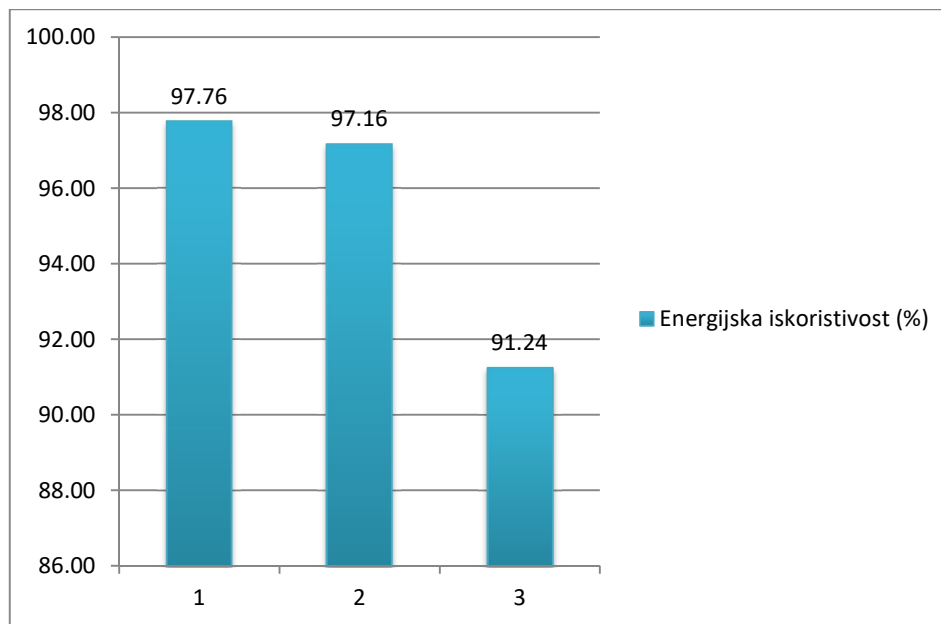
Slika 4.1.5.: Energijski gubici cjelokupnih motora

Na Slici 4.1.6. vidimo da je kod motora 1 najveća energijska iskoristivost na ventilatoru, kod motora 2 na niskotlačnoj turbini, a kod motora 3 na niskotlačnom kompresoru. Najmanju energijsku iskoristivost kod motora 1 i 2 vidimo na niskotlačnom kompresoru, a kod motora 3 na ventilatoru.



Slika 4.1.6.: Energijske iskoristivosti po komponentama motora

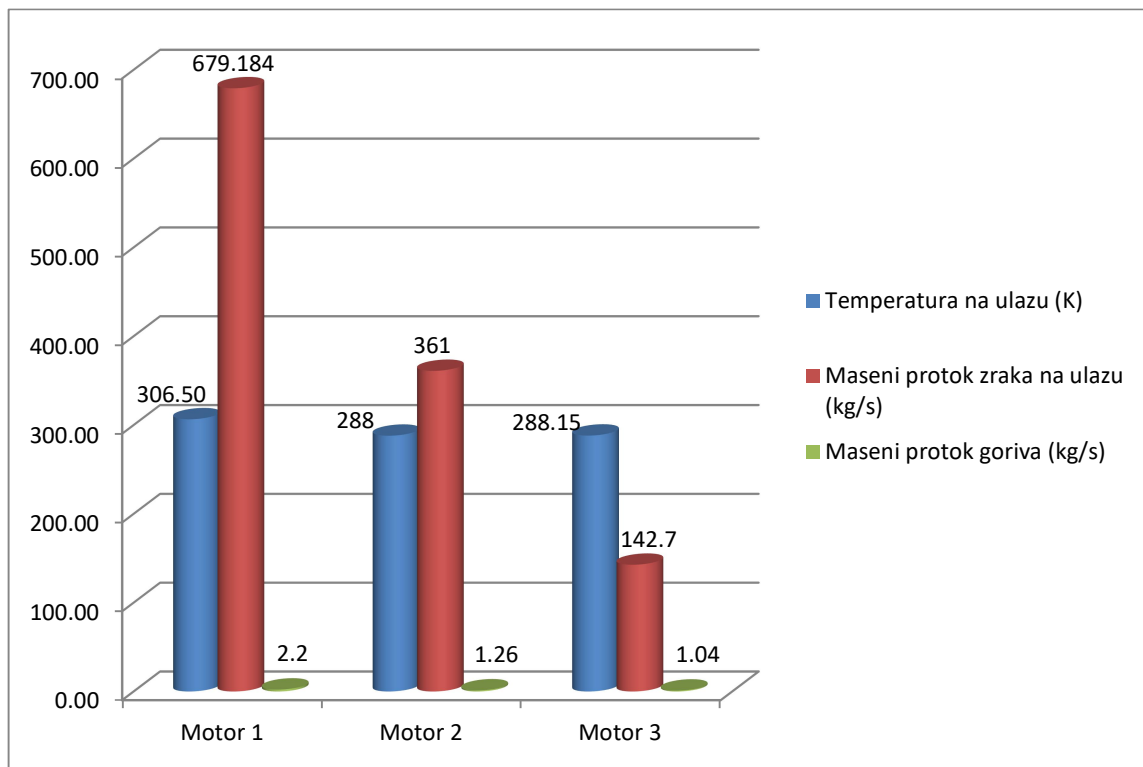
Nadalje, energetski najučinkovitijim se pokazao motor 1, dok je najmanje učinkovit motor 3, što vidimo na Slici 4.1.7. koja nam prikazuje energetske iskoristivosti svih motora.



Slika 4.1.7.: Usporedba energetske iskoristivosti motora

## 4.2. Rezultati proračuna eksergije

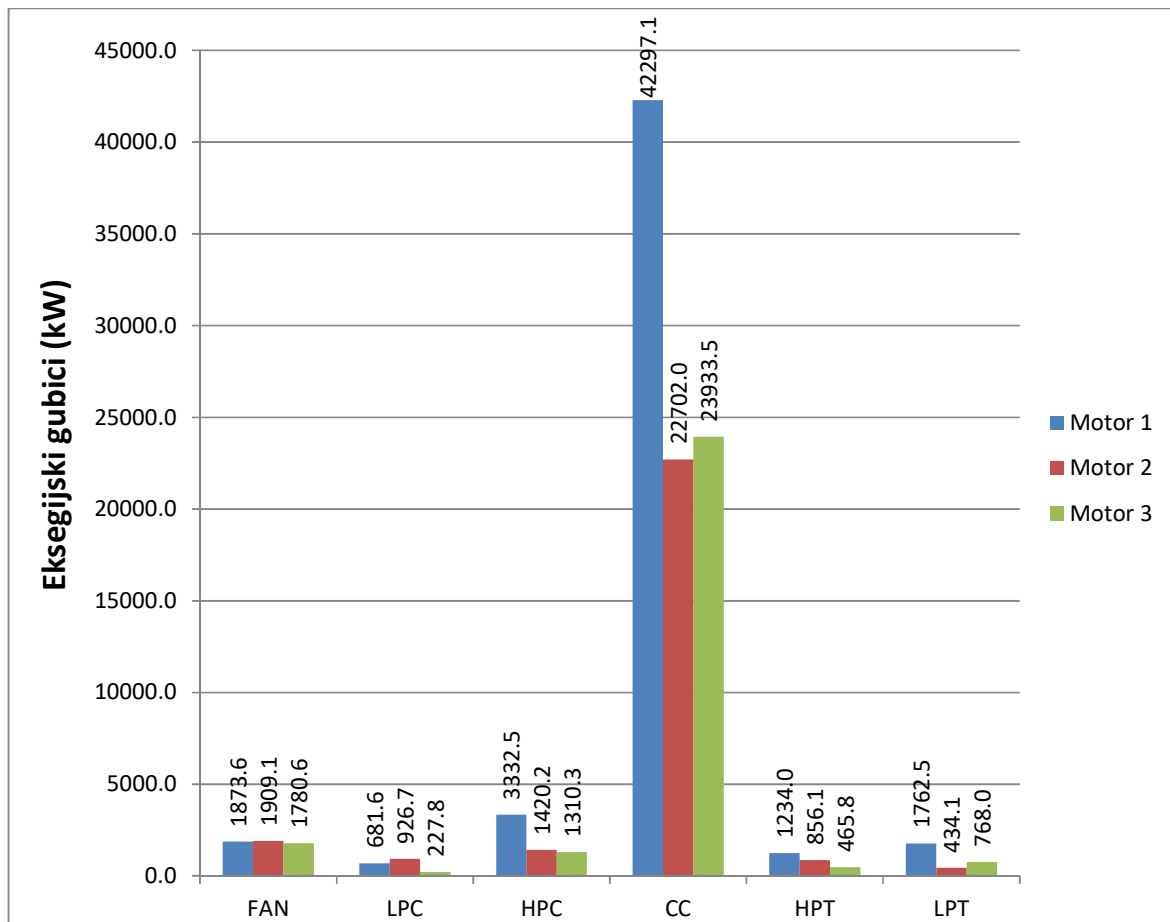
Pri izračunu vrijednosti eksergijskog ulaza i izlaza, kao što je naznačeno izrazima (18, 19), potrebne su vrijednosti masenih protoka i specifičnih eksergija. Specifična eksergija ovisi o temperaturi, entalpijama i entropijama. Na Slici 4.2.1. prikazan je odnos temperatura i masenih protoka na ulazu u motor. Vidimo da je najveći maseni protok onaj na ulazu motora 1, a najmanji na ulazu motora 3. Isto tako, najveću temperaturu uočavamo kod motora 1, a najmanju kod motora 2. Također, na Slici 4.2.1. uočljiv je i maseni protok goriva, te vidimo da je isti najveći kod motora 1, a da najmanje goriva koristi motor 3.



Slika 4.2.1.: Ulazni podaci i maseni protoci goriva svih analiziranih motora



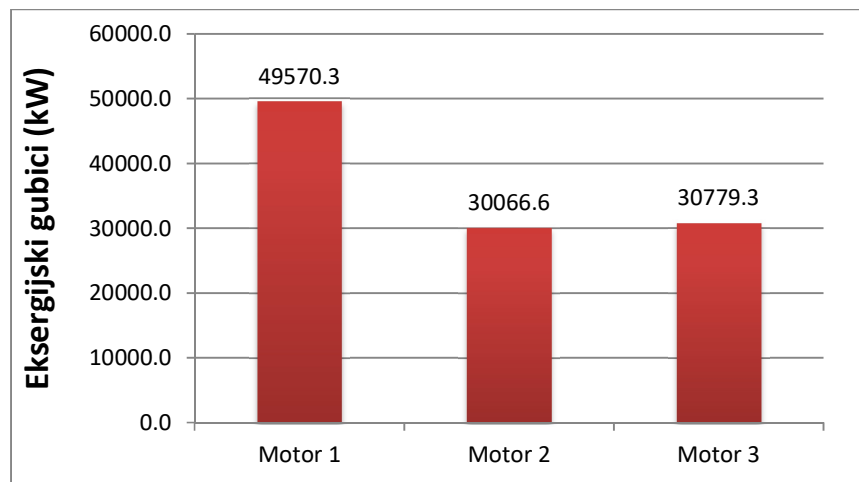
Nakon što smo odredili ulazne podatke, možemo pogledati eksergijske gubitke na Slici 4.2.2. Vidimo da je ventilator s najviše eksergijskih gubitaka onaj na motoru 2, dok najmanje eksergijske gubitke ima ventilator motora 3. Niskotlačni kompresor (LPC) koji je potrošio najviše eksergije pripada motoru 2, a najmanje potrošene eksergije vidimo kod NT kompresora motora 3. Visokotlačni kompresor, komora izgaranja i obe turbine kod motora 1 imaju najviše eksergijskih gubitaka u odnosu na ostale motore. Najmanje eksergijskih gubitaka motor 3 ima na visokotlačnom kompresoru i visokotlačnoj turbini, a motor 2 ima najmanje eksergijske gubitke u komori izgaranja i na niskotlačnoj turbini. Ono što je bitno naglasiti je da komora izgaranja kod svih motora ima osjetno veće eksergijske gubitke u odnosu na sve ostale komponente, a to je vidljivo i iz slike.



Slika 4.2.2.: Usporedba eksergijskih gubitaka pojedinih komponenti motora

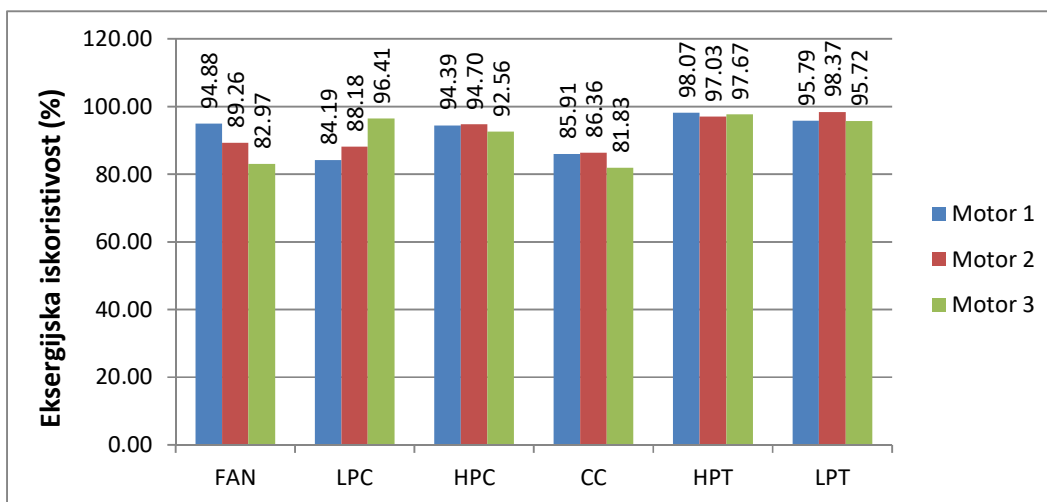
Slijedi usporedba eksergijskih gubitaka cijelih motora, kao što je prikazano Slikom 4.2.3.

Vidimo najveće eksergijske gubitke kod motora 1, a najmanje kod motora 2.



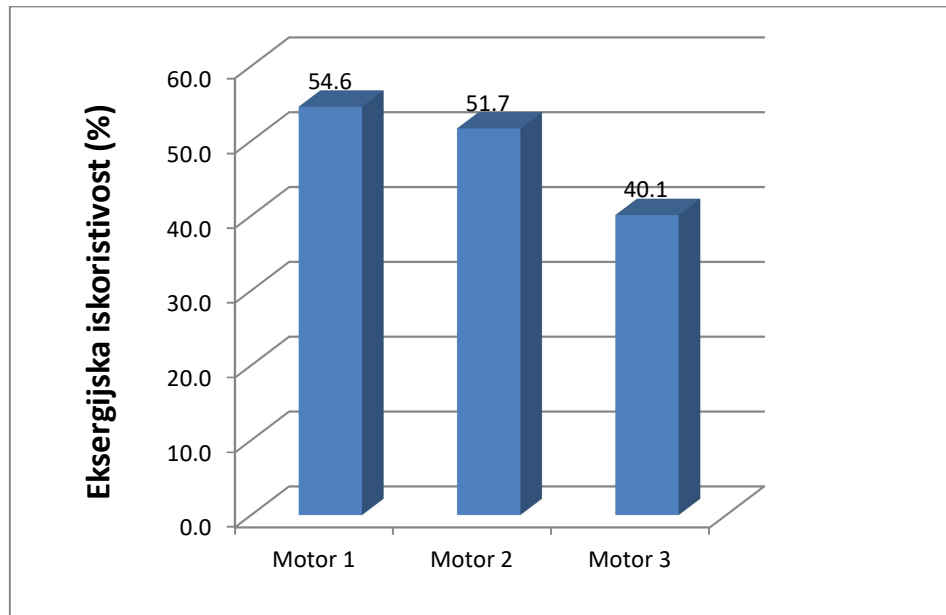
Slika 4.2.3.: Eksergijski gubici cijelog motora

Na Slici 4.2.4. vidimo da kod motora 1 najveću eksergijsku iskoristivost ima VT turbina, a najmanju NT kompresor. Kod motora 2, najveću eksergijsku iskoristivost vidimo kod NT turbine, a najmanju kod komore izgaranja. Isto tako, komora izgaranja ima najmanju eksergijsku iskoristivost od svih komponenti motora 3, a najveću vidimo kod njegove VT turbine.



Slika 4.2.4.: Eksergijske iskoristivosti pojedinih komponenti motora

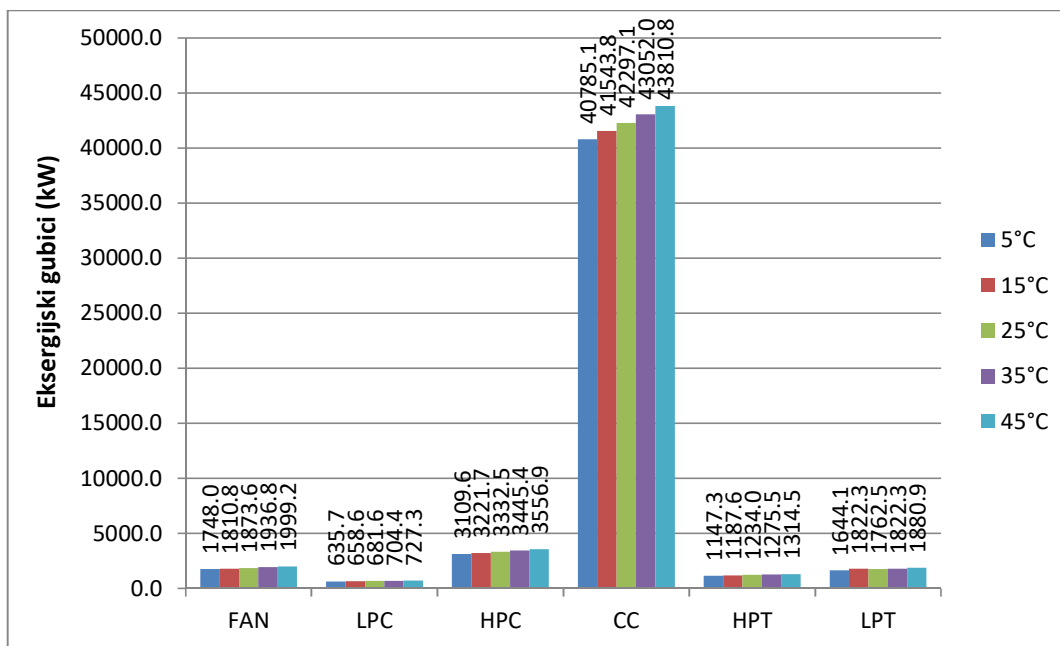
Zatim nam preostaje usporediti eksergijske iskoristivosti cijelih motora, pa tako na Slici 4.2.5. vidimo da je eksergetski najučinkovitiji motor 1, dok najmanju eksergijsku iskoristivost uočavamo kod motora 3.



Slika 4.2.5.: Eksergijske iskoristivosti pojedinih motora

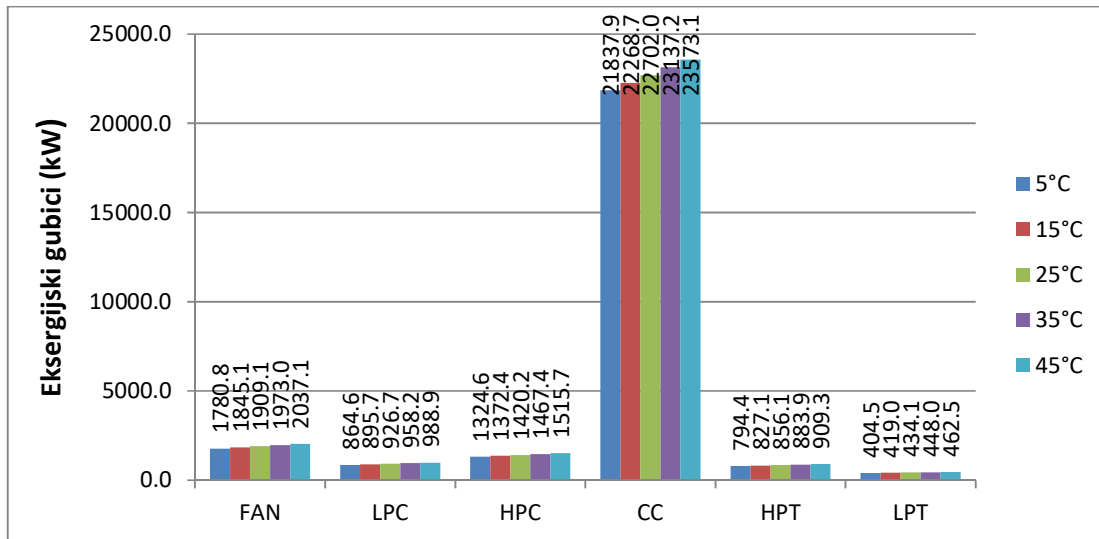
## 5. USPOREDBA I ANALIZA EKSERGIJE U OVISNOSTI O STANJU OKOLINE

Eksergijska bilanca pokazuje odnos dovedenih i odvedenih toplinskih tokova nekom kontrolnom volumenu, uzimajući u obzir stanje okoline ( $p_0$ ,  $T_0$ ) u kojoj se kontrolni volumen nalazi [12]. Stoga, što je manja temperatura okoline, to su eksergijski gubici manji, a eksergijska efikasnost veća. Ovim trima motorima promijenili smo temperaturu okoline četiri puta, tj. izvršili smo isti proračun koji je opisan u poglavlju 4.2., ali s promijenjenom temperaturom okoline. Tako smo izračunali eksergijske parametre s okolinom stanja 5°C, 15°C, 35°C i 45°C. Tlak je za sve slučajeve bio jednak, tj. iznosio je  $p_0 = 1$  bar. Slika 5.1. sadrži usporedbu eksergijskih gubitaka komponenti motora 1 u ovisnosti o temperaturi okoline, pa vidimo da su prethodno navedene teorijske postavke stvarno točne. Naime, na slici je vidljiv porast eksergijskih gubitaka koji prati porast temperature okoline. Najmanje eksergijske gubitke imat ćemo kod slučajeva gdje je i temperatura okoline najmanja.



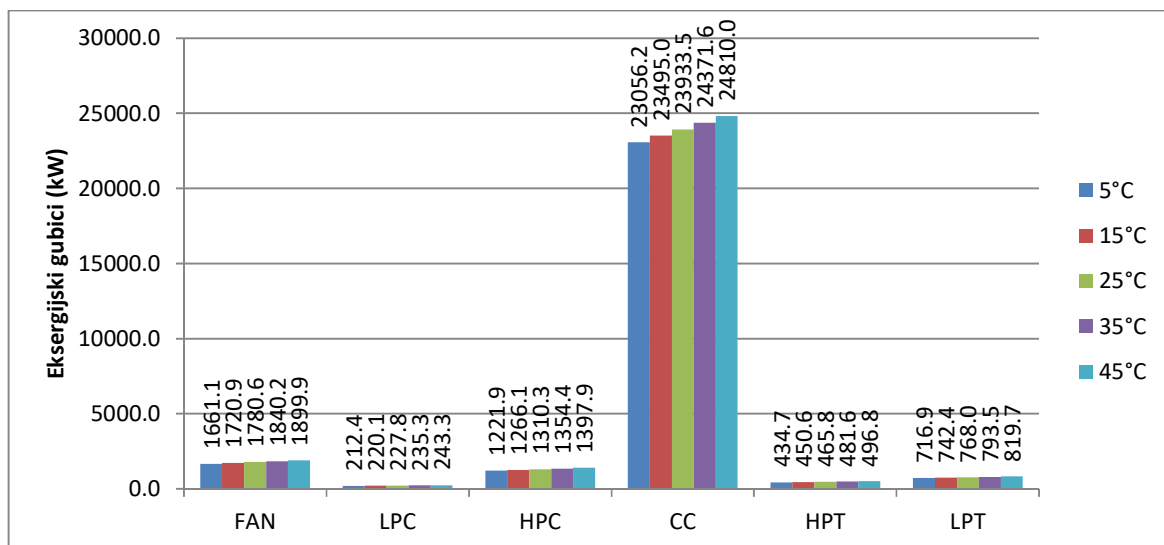
Slika 5.1.: Eksergijski gubici pojedinih komponenti turboventilatorskog motora 1 pri promjeni temperature okoline

Isti slučaj imamo i kod preostala dva motora. Slika 5.2. sadrži eksergijske gubitke na svim komponentama motora 2, te je lako uočljiv porast gubitaka s porastom temperature okoline.



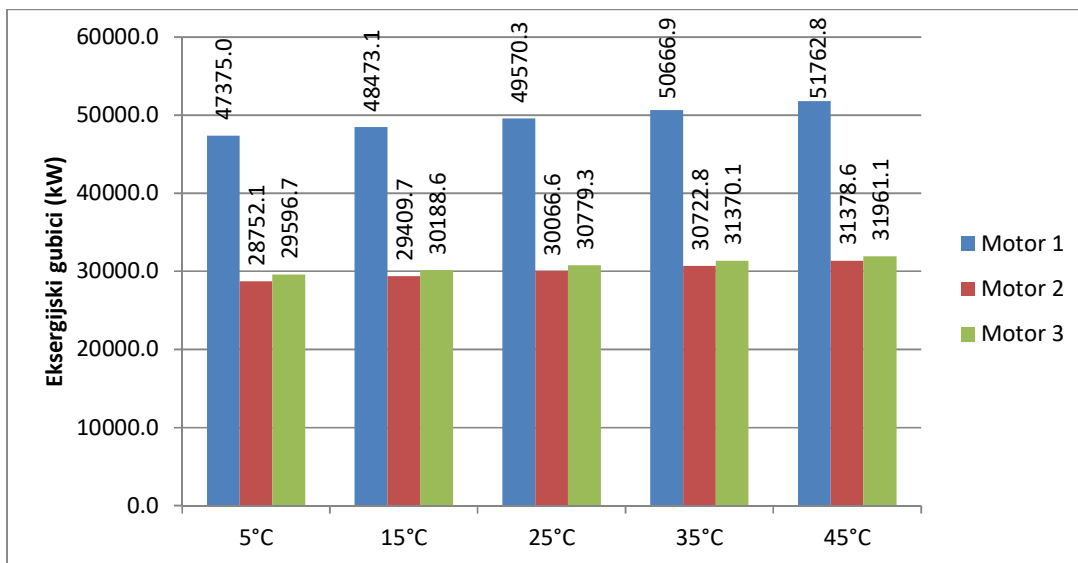
Slika 5.2.: Eksergijski gubici pojedinih komponenti u ovisnosti o temperaturi okoline za motor 2

Na Slici 5.3. vidimo porast eksergijskih gubitaka ovisno o porastu temperature okoline i kod motora 3. Najveći su eksergijski gubici kod komore izgaranja, kao i kod preostala dva motora.



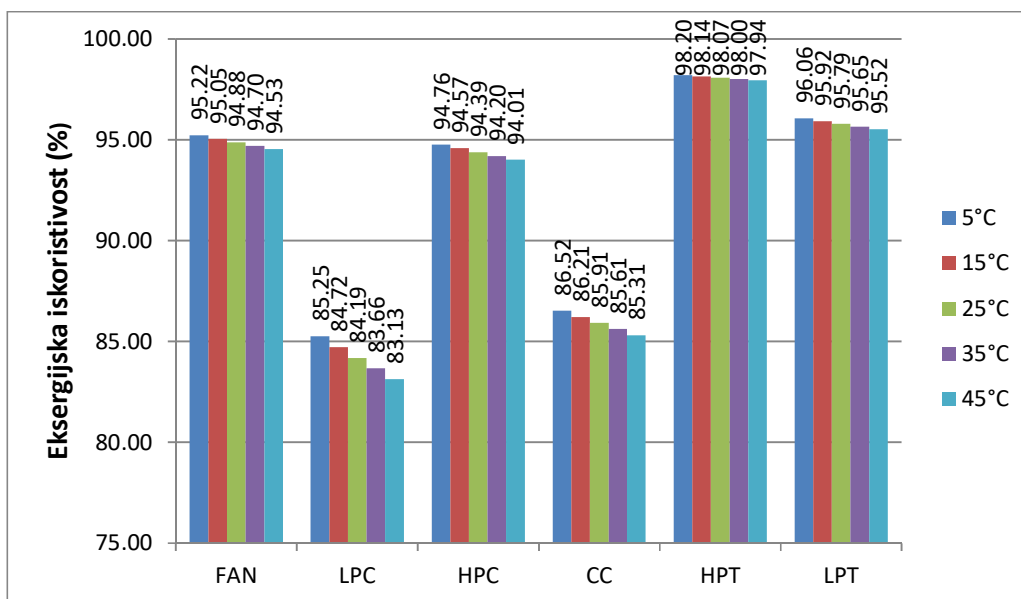
Slika 5.3.: Eksergijski gubici na pojedinim komponentama u ovisnosti o temperaturi okoline za motor 3

Utjecaj porasta temperature okoline na eksergijske gubitke prikazan je i na Slici 5.4., gdje vidimo usporedbu eksergijskih gubitaka cijelih motora. Možemo uočiti da su eksergijski gubici motora 1 najveći, a s porastom temperature okoline su i dodatno porasli.



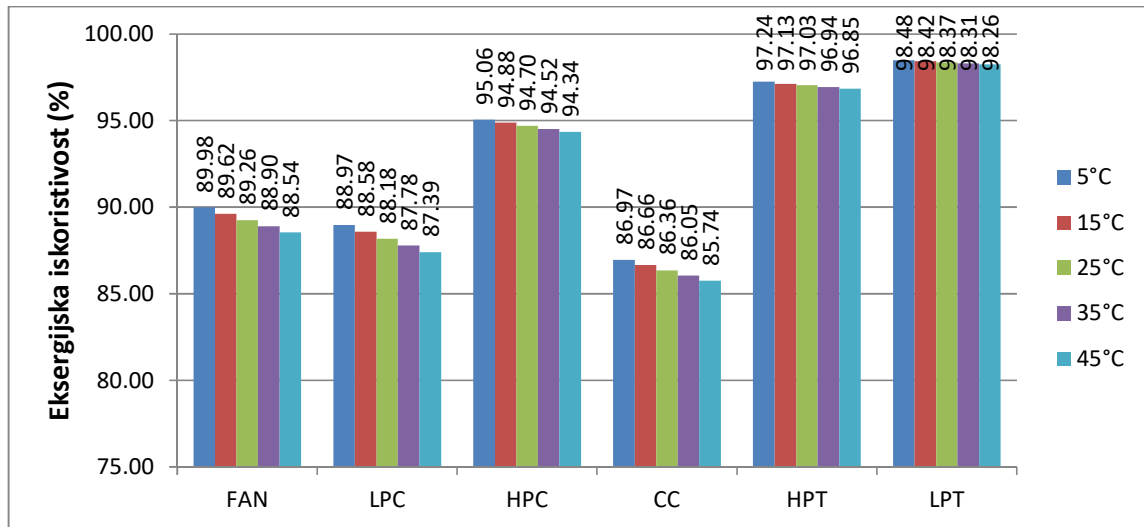
Slika 5.4.: Eksergijski gubici kod pojedinih motora u ovisnosti o temperaturi okoline

Porast temperature okoline za posljedicu ima i pad eksergijske iskoristivosti, što vidimo i na Slici 5.5. gdje su prikazane eksergijske iskoristivosti po komponentama motora 1.



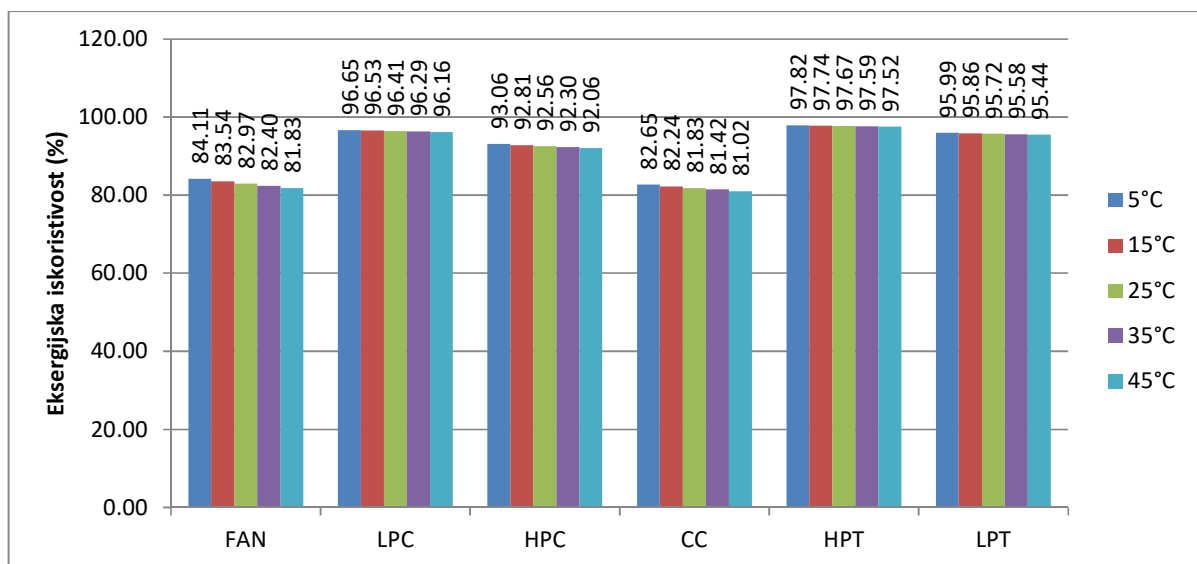
Slika 5.5.: Eksergijske iskoristivosti komponenti u ovisnosti o temperaturi okoline za motor 1

Kao i za motor 1, tako i za motor 2 eksergijska iskoristivost svih komponenti opada povećanjem temperature okoline, što je prikazano i na Slici 5.6.



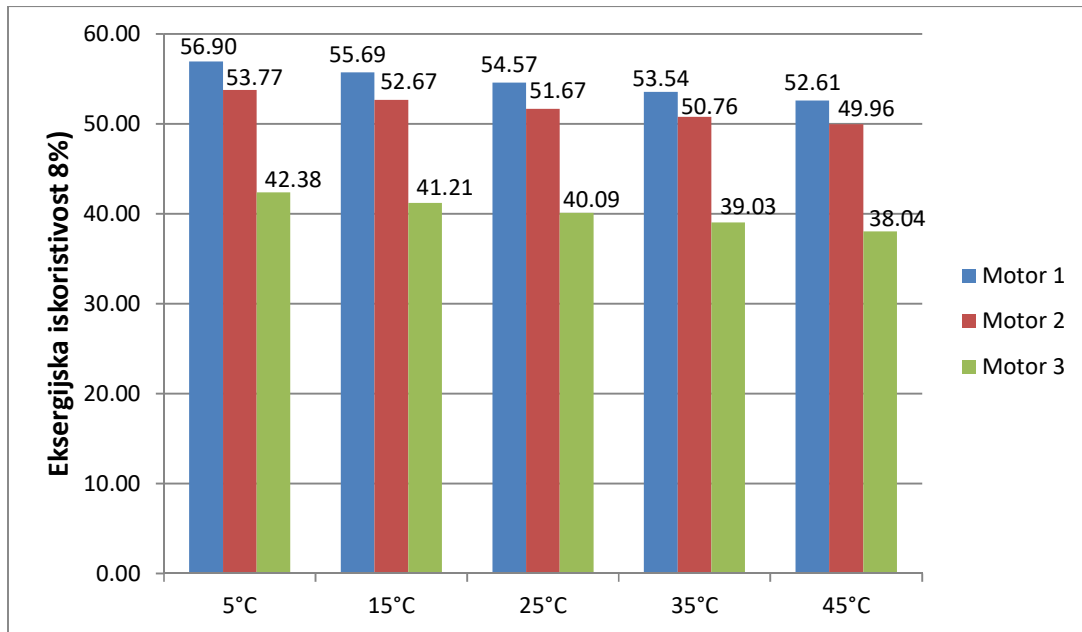
Slika 5.6.: Eksergijske iskoristivosti komponenti u ovisnosti o temperaturi okoline za motor 2

Ni motor 3 nije iznimka. Kao što je prikazano Slikom 5.7., eksergijske iskoristivosti svih komponenti smanjuju se pri povećanju temperature okoline.



Slika 5.7.: Eksergijske iskoristivosti komponenti u ovisnosti o temperaturi okoline za motor 3

Na Slici 5.8. prikazan je pad eksergijske iskoristivosti analiziranih motora. Najveći pad eksergijske iskoristivosti analiziranih motora pri porastu temperature okoline vidljiv je kod motora 3, kod kojeg je porastom temperature okoline eksergijska iskoristivost smanjena ukupno za 4.34%.



Slika 5.8.: Eksergijske iskoristivosti cijelih motora u ovisnosti o porastu temperature okoline

U ovom se poglavlju nije spominjala energijska iskoristivost jer energijska bilanca pokazuje odnos dovedenih i odvedenih toplinskih tokova nekom kontrolnom volumenu bez obzira na stanje okoline u kojoj se kontrolni volumen nalazi [12]. Drugim riječima, energijski gubici, kao ni energijska iskoristivost, nisu ovisni o temperaturi okoline, pa su rezultati energijske analize uvijek identični za bilo koju promatranu temperaturu okoline.



## 6. ZAKLJUČAK

Turboventilatorski motori su najmodernija varijacija obične plinske turbine, i najznačajnija komponenta zrakoplovnih motora. Njihova korisnost u putničkom prijevozu, kao i u prijevozu korisnog tereta, bitan je parametar rada cijelog sustava čiji je turboventilatorski motor sastavni dio. To za posljedicu ima razvijanje novih tehnologija koje bi omogućile povećanje iskoristivosti ovih motora.

Kod izvršene energijske analize utvrđeno je sljedeće: kod svih motora najveći energijski gubici su kod komore izgaranja. Najmanji energijski gubici su kod NT kompresora motora 3. Najveću energijsku iskoristivost ima niskotlačna turbina motora 2, a najmanju NT kompresor motora 1. Motor 2 ima najmanje energijskih gubitaka, a njegova je energijska iskoristivost neznatno manja od one motora 1. Stoga, iz svega navedenog proizlazi da je motor 2, od tri analizirana, energijski “najbolji” motor. Nadalje, “najlošijim” se, od tri analizirana motora, pokazao motor 3 jer ima najveće energijske gubitke, a najmanju energijsku iskoristivost.

Što se tiče eksergijske analize, najveći su eksergijski gubici kod sva tri analizirana motora utvrđeni kod komore izgaranja. Također, najmanje eksergijske gubitke ima NT kompresor motora 3. Zatim, najveću eksergijsku iskoristivost ima niskotlačna turbina motora 2, a najmanju komora izgaranja motora 3. Iako je kod motora 1 utvrđena najveća iskoristivost, ista nije puno manja ni kod motora 2. Eksergijski gubici su također najmanji kod motora 2, pa iz toga slijedi da je i u slučaju eksergijske analize motor 2 “najbolji”, a motor 3 “najlošiji” jer ima velike eksergijske gubitke i najmanju eksergijsku iskoristivost.

Isto tako, prilikom mijenjanja temperaturnih parametara okoline, energijski dio ostao je nepromijenjen jer je neovisan o okolini u kojoj se nalazi. Kod eksergijskog dijela smo uvidjeli da je temperatura okoline utjecajan čimbenik eksergijske analize jer porastom temperature okoline rastu eksergijski gubici, a eksergijska se iskoristivost smanjuje, kako za sve analizirane turboventilatorske motore, tako i za sve njihove komponente.

Manipuliranjem određenih parametara možemo utjecati na iskoristivost motora, što znači da se različitim inženjerskim rješenjima mogu proizvesti turboventilatorski motori koji će biti još učinkovitiji.

## LITERATURA

- [1] Hrvatska enciklopedija, s Interneta, <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=41358>, 19. srpnja 2023.
- [2] Mrzljak, V.: “TOPSIU 2: Predavanje 8”, 2021.
- [3] Kadi, L., & Mrzljak, V. (2021). Efficiencies and losses comparison of various turbofan engines for aircraft propulsion. Ri-STEM-2021, 63.
- [4] Hrvatska enciklopedija, s Interneta, <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=62726>, 19. srpnja 2023.
- [5] Bošnjaković, F: “Nauka o toplini I”, Nakladni zavod Hrvatske, Zagreb, 1970.
- [6] Mrzljak, V., Poljak, I., Jelić, M., & Prpić-Oršić, J. (2023). Thermodynamic Analysis and Improvement Potential of Helium Closed Cycle Gas Turbine Power Plant at Four Loads. *Energies*, 16(15), 5589.
- [7] Mrzljak, V., Anđelić, N., Lorencin, I., & Car, Z. (2019). Analysis of gas turbine operation before and after major maintenance. *Pomorski zbornik*, 57(1), 57-70.
- [8] Mrzljak, V., Perčić, G., & Prpić-Oršić, J. (2018). Gas turbine upgrade with heat regenerator-numerical analysis of advantages and disadvantages. In *Third International Scientific Conference-Winter Session “Industry (Vol. 4, p. 2018)*.
- [9] Mrzljak, V., Poljak, I., Prpić-Oršić, J., & Jelić, M. (2020). Exergy analysis of marine waste heat recovery CO<sub>2</sub> closed-cycle gas turbine system. *Pomorstvo*, 34(2), 309-322.
- [10] Salma, D., & Mrzljak, V. (2021). Comparison of open and closed gas turbine cycles. *RiSTEM-2021*, 121.
- [11] Ganesan, V.: “Gas Turbine, 3/e”, Tata McGraw Hill Education Private Limited, New Delhi, 2010.
- [12] Mrzljak, V.: “Toplinske turbine: Predavanje 12.: Energijska i eksergijska analiza parnoturbinskih i plinskoturbinskih postrojenja”, 2021.

## POPIS SLIKA

Slika 2.1.1.: Dijelovi turboventilatorskog motora .....	3
Slika 2.1.2.: Shema jednog stupnja aksijalnog turbokompresora s trokutima brzina na ulazu i izlazu iz rotora .....	4
Slika 2.1.3.: Komora izgaranja .....	5
Slika 2.1.4.: Aksijalna turbina .....	6
Slika 2.1.5.: Različite izvedbe aksijalnih ventilatora .....	7
Slika 2.2.1.: a) Prikaz plinske turbine, b) Jouleov (Braytonov) idealni proces u pV-, tj. Ts dijagramu .....	8
Slika 2.2.2.: Usporedba stvarnog i realnog Braytonovog procesa [2] .....	9
Slika 2.3.1.: Presjek turboventilatorskog motora s jednostrukim ventilatorom .....	10
Slika 2.3.2.: Turboventilatorski motor .....	11
Slika 3.1.1.: Shema prvog turboventilatorskog motora.....	12
Slika 3.1.2.: Shema drugog zadanog turboventilatorskog motora.....	13
Slika 3.1.3.: Shema trećeg turboventilatorskog motora .....	14
Slika 3.2.1.: Prikaz idealne (adijabatske) i stvarne (politropske) kompresije zraka kod ventilatora u h/s dijagramu .....	15
Slika 3.2.2.: Prikaz idealne (adijabatske) i stvarne (politropske) kompresije kod visokotlačnog kompresora u h/s dijagramu .....	17
Slika 3.2.3.: Politropska i adijabatska ekspanzija zraka u visokotlačnoj turbini u h/s dijagramu .....	19
Slika 3.2.4.: Prikaz ulaza i izlaza za cijeli motor.....	21
Slika 3.2.5.: Prikaz politropske i adijabatske ekspanzije zraka kod NT turbine u h/s dijagramu .....	26
Slika 4.1.1.: Snage potrebne za pogon VT kompresora zadanih motora .....	27
Slika 4.1.2.: Usporedba idealnih i realnih snaga kod visokotlačnih turbina tri različita .....	28
turboventilatorska motora.....	28
Slika 4.1.3.: Usporedba korisnih snaga analiziranih motora.....	29
Slika 4.1.4.: Energijski gubici po komponentama motora .....	30
Slika 4.1.5.: Energijski gubici cjelokupnih motora.....	31
Slika 4.1.6.: Energijske iskoristivosti po komponentama motora .....	31
Slika 4.1.7.: Usporedba energijskih iskoristivosti motora .....	32
Slika 4.2.1.: Ulazni podaci i maseni protoci goriva svih analiziranih motora.....	33

Slika 4.2.2.: Usporedba eksergijskih gubitaka pojedinih komponenti motora.....	34
Slika 4.2.3.: Eksergijski gubici cijelog motora.....	35
Slika 4.2.4.: Eksergijske iskoristivosti pojedinih komponenti motora .....	35
Slika 4.2.5.: Eksergijske iskoristivosti pojedinih motora.....	36
Slika 5.1.: Eksergijski gubici pojedinih komponenti turboventilatorskog motora 1 pri promjeni temperature okoline.....	37
Slika 5.2.: Eksergijski gubici pojedinih komponenti u ovisnosti o temperaturi okoline za motor 2 .....	38
Slika 5.3.: Eksergijski gubici na pojedinim komponentama u ovisnosti o temperaturi okoline za motor 3 .....	38
Slika 5.4.: Eksergijski gubici kod pojedinih motora u ovisnosti o temperaturi okoline .....	39
Slika 5.5.: Eksergijske iskoristivosti komponenti u ovisnosti o temperaturi okoline za motor 1 .....	39
Slika 5.6.: Eksergijske iskoristivosti komponenti u ovisnosti o temperaturi okoline za motor 2 .....	40
Slika 5.7.: Eksergijske iskoristivosti komponenti u ovisnosti o temperaturi okoline za motor 3 .....	40
Slika 5.8.: Eksergijske iskoristivosti cijelih motora u ovisnosti o porastu temperature okoline .....	41

## **POPIS TABLICA**

Tablica 1.: Zadani ulazni podaci prvog turboventilatorskog motora .....	12
Tablica 2.: Zadani ulazni podaci drugog turboventilatorskog motora .....	13
Tablica 3.: Zadani ulazni podaci trećeg turboventilatorskog motora .....	14

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis/značenje
$p$	[Pa]	Tlak
$T$	[K]	Temperatura
$\dot{m}_{UL}$	[kg/s]	Maseni protok zraka na ulazu u komponentu ili motor
$\dot{m}_{IZ}$	[kg/s]	Maseni protok zraka na izlazu iz komponente ili motora
$h$	[kJ/kg]	Specifična entalpija
$\eta$		Iskoristivost
$s$	[kJ/kgK]	Specifična entropija
$ex$	[kJ/kg]	Specifična eksergija
$Ex$	[kW]	Eksergija/eksergijski tok
$En$	[kW]	Energija/energijski tok
$P_{AD}$	[kW]	Idealna snaga
$P_{PT}$	[kW]	Stvarna snaga

## SAŽETAK

Rad se bavi analizom i usporedbom turboventilatorskih motora. Na temelju zadanih radnih parametara izrađen je termodinamički proračun za sva tri zadana turboventilatorska motora i sve njihove komponente (ventilator, turbokompresore, komoru izgaranja i turbine). Time su, za sve komponente, kao i cjelokupne motore, dobiveni sljedeći podaci: idealna i realna snaga, energijski gubici, energijska iskoristivost, eksergijski ulaz i izlaz, eksergijski gubici, eksergijska iskoristivost, korisna snaga. Ti su rezultati bili temelj za izvršavanje energijske i eksergijske analize.

Provedene su analize rezultirale sljedećim zaključcima: korisne snage će biti veće što je veća potreba za pokrivanjem mehaničkih gubitaka motora. Također, što je veći maseni protok goriva, to će iskoristivost motora biti veća. Utvrđeno je i da je energija neovisna o utjecajima okoline, dok kod eksergije to nije slučaj, tj. porast okolne temperature će dovesti do većih eksergijskih gubitaka i manje eksergijske iskoristivosti motora.

**Ključne riječi:** Plinska turbina, Turboventilatorski motor, Energijska analiza, Eksergijska analiza

## **SUMMARY**

This paper presents analysis and comparison of three turbofan engines. By using given operating parameters, an extensive thermodynamic calculation was made in regards to every component as well as overall engines. This way, the following data was obtained: ideal and real power, energy losses, energy efficiency, exergy input and output, exergy losses, exergy efficiency and useful power. These results were the basis for comparing engine components and engines as a whole.

These comparisons were made by analyzing energy and exergy parameters in every engine and every component in it. The analysis yielded some conclusions, such as: the greater the need to cover for engine's mechanical losses, the greater the useful power. Furthermore, engines that use more fuel tend to have greater efficiencies. It was also noted that energy is independent of environmental influences, but exergy is not, i.e. increasing the temperature of the environment will lead to greater losses of exergy and less efficient engines.

**Key words:** Gas turbine, Turbofan engine, Energy analysis, Exergy analysis