

# KONSTRUKCIJA MODELA TERMOAKUSTIČNOG MOTORA

---

Zorić, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:979218>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-24**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

STROJARSKI ODJEL

PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

IVAN ZORIĆ

**KONSTRUKCIJA MODELA  
TERMOAKUSTIČKOG MOTORA**

ZAVRŠNI RAD

KARLOVAC, 2021.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

STROJARSKI ODJEL

PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

IVAN ZORIĆ

**KONSTRUKCIJA MODELA  
TERMOAKUSTIČKOG MOTORA**

ZAVRŠNI RAD

dr. sc. Tihomir Mihalić

KARLOVAC, 2021.

# IZJAVA

Izjavljujem da sam završni rad na temu TERMOAKUSTIČKI STROJEVI izradio samostalno koristeći stečeno znanje tokom studija, navedenu literaturu, pomoć mentora te izradu pokusa.

Zahvaljujem se mentoru doc.dr.sc. Tihomiru Mihaliću na ustupljenoj pomoći u vidu smjernica te savjeta koje mi je sugerirao tokom izrade ovog završnog rada.

Također se zahvaljujem svima koji su mi bili podrška tokom studiranja, a posebice obitelji.

Karlovac, 2021.

Ivan Zorić

---

## **SAŽETAK**

Termoakustika je znanstvena disciplina koja kombinira zvuk i toplinu, a postoji od davnina. Prvi su se sa njom upoznali staklari koji su uočavali zvukove prilikom uranjanja vrućih staklenih boca u vodu.

U ovom radu ćemo se prvo upoznati sa općim pojmovima koji su nam nužni da bi mogli razumjeti princip rada termoakustičkog stroja. Nakon toga ćemo navesti komponente istoga, njegovu podjelu te princip rada. Na kraju ćemo prikazati dosadašnja ostvarenja u termoakustičkom polju te izraditi termoakustički motor.

Ključne riječi: termoakustika, zvuk, toplina, termoakustički motor

## **SUMMARY**

Thermoacoustics is a scientific discipline that combines sound and heat, and has existed since ancient times. Glassmakers were the first to meet her, noticing sounds when immersing hot glass bottles in water.

In this paper, we will first get to meet with the general concepts that are needed for us to be able to understand the principle of operation of a thermoacoustic machine. After that, we will list the components of the same, its distribution and the principle of operation. Finally, we will present previous achievements in the thermoacoustic field and make thermoacoustic motor.

Keywords: thermoacoustics, sound, heat, thermoacoustic motor

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. TEORIJSKI DIO .....	2
2.1. Povijest.....	2
2.2. Opći pojmovi.....	3
2.3. Termoakustika.....	11
2.4. Komponente termoakustičkog stroja .....	12
2.5. Akustička frekvencija i duljina rezonantne cijevi .....	13
2.6. Srednji tlak.....	15
2.7. Materijal poroznog elementa (stoga) .....	15
2.8. Princip rada .....	16
2.9. Podjela .....	17
2.10. Termoakustički motor .....	17
2.11. Termoakustičke pumpe .....	19
2.12. Razlika između dizalice topline i hladnjaka .....	21
2.13. Dosadašnja ostvarenja i primjeri .....	22
2.14. Stirlingov motor .....	27
3. POSTAVKA ZADATKA.....	29
4. PRAKTIČNI DIO .....	30
4.1. Nosač .....	30
4.2. Klip i cilindar .....	32
4.3. Radno kolo .....	33
4.4. Klipnjača i spojevi.....	38
4.5. Porozni element .....	42
4.6. Postolje .....	43
4.7. Termoakustički stirlingov motor .....	44
5. ANALIZA REZULTATA.....	45
6. ZAKLJUČAK.....	46

## POPIS SLIKA

Slika 1. Rijkeova cijev .....	2
Slika 2. Sondhausova cijev .....	2
Slika 3. Stojni val .....	3
Slika 4. Rezonancija .....	4
Slika 5. Prikaz idealnih plinova u p-V dijagramu .....	5
Slika 6. Pretvorba energije.....	5
Slika 7. Termodinamički sustav .....	6
Slika 8. Shematski prikaz zakona o održanju energije.....	7
Slika 9. Zatvoreni sustav .....	8
Slika 10. Ekspanzija .....	9
Slika 11. Kompresija.....	9
Slika 12. Prikaz kružnog procesa .....	10
Slika 13. Prikaz desnokretnog kružnog procesa.....	10
Slika 14. Prikaz lijevokretnog kružnog procesa .....	11
Slika 15. Termoakustički uređaj.....	12
Slika 16. Raspored tlaka i brzine u rezonantnoj cijevi termoakustičkog hladnjaka .....	13
Slika 17. Struktura metalne pjene .....	15
Slika 18. PVC – polimerne pjene .....	15
Slika 19. Shema toplinske pumpe .....	17
Slika 20. Shema rashladnog stroja .....	17
Slika 21. Pojednostavljeni desnokretni termoakustički ciklus.....	18
Slika 22. Pojednostavljeni lijevokretni termoakustički ciklus .....	19
Slika 23. Usporedba procesa u rashladnom uređaju i dizalici topline .....	21
Slika 24. STAR .....	22
Slika 25. Presjek i tokovi rada i topline .....	23
Slika 26. TRITON .....	24
Slika 27. Termoakustički hladnjak (TAR).....	25
Slika 28. Solarni termoakustički stroj .....	26
Slika 29. Termoakustički Stirlingov stroj .....	27
Slika 30. Stirlingov proces u p-V i T-s dijagramu .....	28
Slika 31. Drugi dio nosača .....	30
Slika 32. Spoj prvog i drugog dijela nosača .....	31
Slika 33. Klip i cilindar.....	32
Slika 34. Proces ljepljenja CD diskova .....	33
Slika 35. Spojeni CD diskovi u radno kolo .....	34
Slika 36. Pozicionirane rupe na radnom kolu.....	35
Slika 37. Ležaj 6001RS .....	36
Slika 38. Radno kolo.....	37
Slika 39. Dio za spoj klipnjače i klipa .....	38
Slika 40. Spojeni dio na klip.....	39
Slika 41. Klipnjača sa dijelovima za spoj sa radnim kolom .....	40
Slika 42. Spoj klipnjače sa radnim kolom .....	41
Slika 43. Čelična vuna .....	42
Slika 44. Postolje sa nosačem radnog kola .....	43
Slika 45. Termoakustički Stirlingov motor.....	44



## **POPIS TABLICA**

Tablica 1 Podjela termodinamičkih sustava.....	6
Tablica 2. Faktori za ocjenu efikasnosti lijevokretnih sustava.....	20

## POPIS OZNAKA

OZNAKA	MJERNA JEDINICA	NAZIV OZNAKE
$p_m$	kPa	Srednji tlak
$p$	kPa	Tlak
$Re$	-	Realni dio kompleksnog broja
$p_1$	m	Amplituda oscilacije tlaka
$f$	Hz	Frekvencija
$V$	cm <sup>3</sup>	Volumen
$T$	K	Termodinamička temperatura
$n$	mol	Količina tvari
$R$	J/molK	Opća plinska konstanta
$Q$	J	Toplina
$E$	J	Energija radnog fluida
$W$	J	Mehanički rad
$m$	Kg	Masa
$\dot{E}_u$	J/s	Energija na ulazu u sustav
$\dot{E}_l$	J/s	Energija na izlazu iz sustava
$\dot{W}$	J/s	Tehnički rad
$\dot{\emptyset}$	J/s	Toplinski tok
$dE$	J	Diferencijal energije
$dm$	Kg	Diferencijal mase
$dt$	s	Diferencijal vremena
$U_1$	J	Unutarnja energija na ulazu
$U_2$	J	Unutarnja energija na izlazu
$\eta$	%	Koeficijent iskoristivosti ciklusa
$T_g$	K	Najveća moguća temperatura
$T_h$	K	Najmanja moguća temperatura
$c$	m/s	Brzina zvuka
$L$	mm	Duljina rezonantne cijevi
$\kappa$		Izentropski eksponent
$R_m$	J/molK	Molarna plinska konstanta
$M$	kg/mol	Molarna masa plina
$\delta_K$	W/m <sup>2</sup> K	Koeficijent toplinskog prodiranja
$a$	mm	Razmak između površina poroznog elementa
$\omega$	rad/s	Kutna brzina
$\lambda$	m	Valna duljina
$c_p$	J/kgK	Specifični toplinski kapacitet

$\beta_R$	%	Koeficijent efikasnosti ciklusa
-----------	---	---------------------------------

## 1. UVOD

Znanstvena disciplina koja proučava pojave povezane s nastankom i funkcijom zvuka naziva se akustika. Zvuk nastaje titranjem čestica oko ravnotežnog položaja. Vibracije čestica mogu uzrokovati oscilacije tlaka, gustoće, temperature i volumena oko ravnotežnog položaja. Proces pretvaranja toplinske energije u akustičku energiju i obrnuto uz pomoć ovih oscilacija naziva se termoakustičkim efektom.

Termoakustični motori privlače veliku pozornost zbog nedostatka pokretnih dijelova i relativno blagog utjecaja na okoliš.

Praktični dio ovog završnog rada je termoakustični motor koji toplinsku energiju preko akustične, odnosno zvučne pretvara u mehanički rad.

## 2. TEORIJSKI DIO

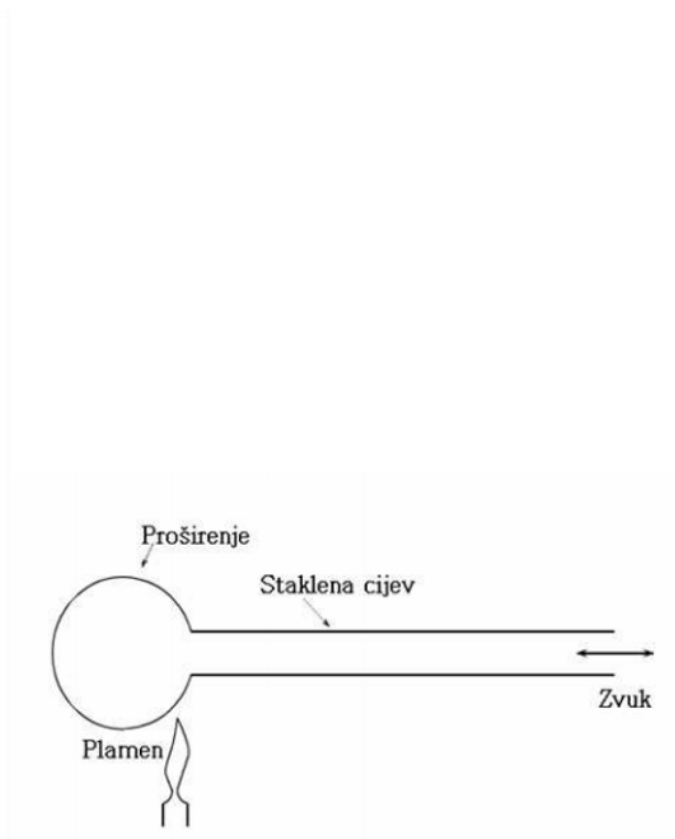
### 2.1. Povijest

Termoakustičke pojave poznate su više od 2 stoljeća. Byron Higgins 1777. godine primjećuje i proučava akustične oscilacije u dugačkim cijevima grijanim vodikovim plamenom. Tada su za tu pojavu koristili naziv pjevajuća vatra. Kada je Rijke 1859. godine postavio ugrijanu žičanu mrežicu u cijev zatvorenu sa jedne strane, nastale su snažne akustičke oscilacije. Isto tako došao je do zaključka da su oscilacije jače kada postavi mrežicu na jednoj četvrtini od ukupne duljine cijevi (slika 1.).

Eksperimentalno proučavanje pojave zvuka prilikom hlađenja vrućih staklenih boca proveo je Sondhaus 1850. godine (slika 2.), a Lord Rayleigh objašnjava Sondhausov efekt 1896. godine te daje definiciju termoakustičnih oscilacija: „Ako se zraku dovodi toplina u trenutku najvećeg zgušnjavanja ili odvodi u trenutku najvećeg razrjeđenja, pojavljuju se vibracije. [1]



Slika 1. Rijkeova cijev [1]

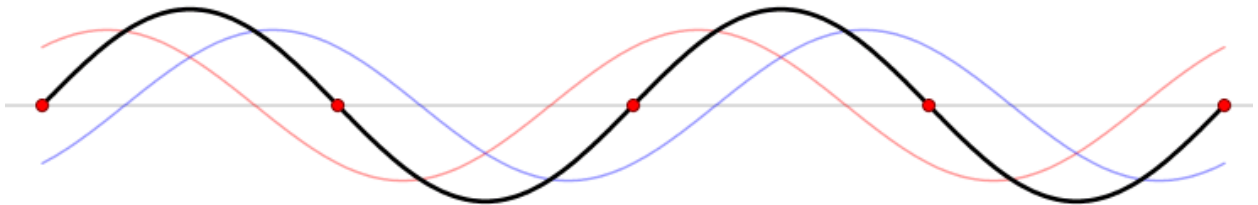


Slika 2. Sondhausova cijev [1]

## 2.2. Opći pojmovi

### 2.2.1. Stojni val

Stojni val (Slika 3.) je val koji nastaje zbrajanjem dvaju valova jednakih frekvencija i amplituda, a kreću se u suprotnim smjerovima (plavo i crveno). [2]



Slika 3. Stojni val [2]

Matematički prikaz oscilacije tlaka određene frekvencije za stojni val:

$$p(x,t) = p_m + \text{Re}(p_1(x) \cdot e^{i\omega t}) \quad (1)$$

$p_m$  – srednji tlak

Re – realni dio kompleksnog broja

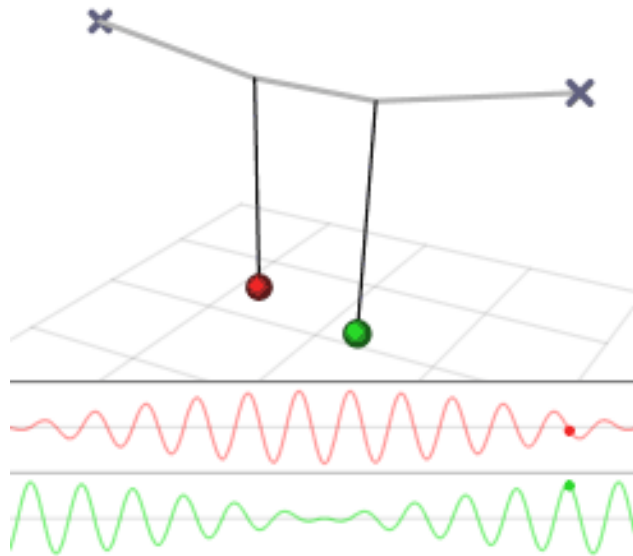
$p_1$  – amplituda oscilacije tlaka

$\omega = 2\pi f$  – kružna frekvencija akustičkih oscilacija

$f$  – frekvencija akustičkih oscilacija

### 2.2.2. Rezonancija

Rezonancija (Slika 4.) je titranje fizikalnoga sustava pobuđenog nekim vanjskim periodičkim silama, a njegova je frekvencija u skladu sa prirodnom (vlastitom) frekvencijom sustava. [3]



Slika 4. Rezonancija [3]

### 2.2.3. Jednadžba stanja idealnog plina

Jednadžba stanja idealnog plina (slika 5.) povezuje termodinamičku temperaturu, volumen i tlak idealnog plina. Promjenom jedne od navedenih tri veličina promijenit će se i ostale veličine. Matematički izraz jednadžbe stanja idealnog plina: [4]

$$pV = nRT \quad (2)$$

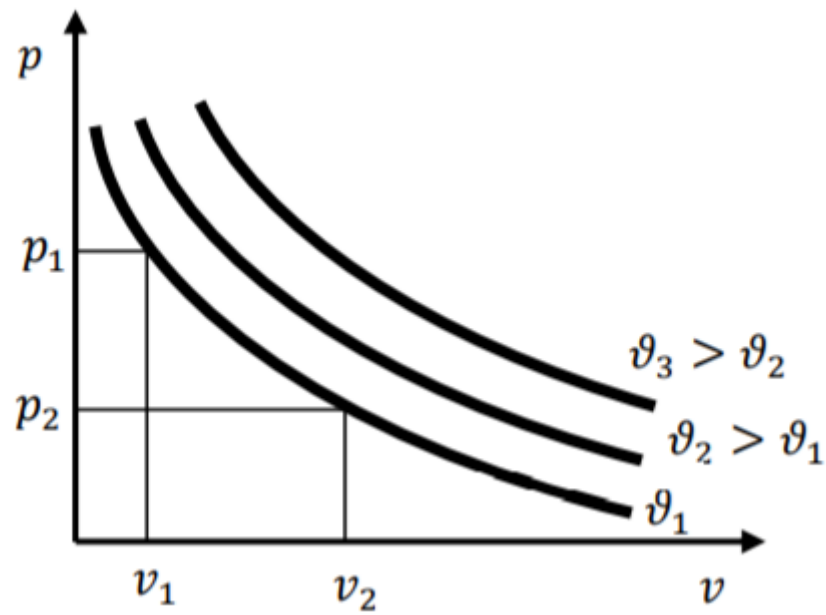
$p$  – tlak

$V$  – volumen

$T$  – temperatura

$n$  – količina tvari

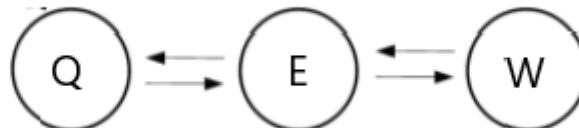
$R$  – opća plinska konstanta



Slika 5. Prikaz idealnih plinova u p-V dijagramu [4]

#### 2.2.4. Energija

U prirodi postoje 3 osnovna oblika energije [5]:



Slika 6. Pretvorba energije [4]

$Q$  – toplina

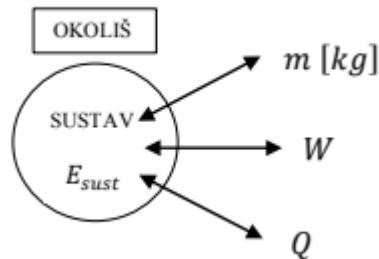
$E$  – energija radnog fluida

$W$  – rad



## 2.2.5. Termodinamički sustav

Termodinamički sustav (slika 7.) predstavlja područje omeđeno zamišljenom granicom koja se najčešće poklapa sa fizičkom granicom. [4]



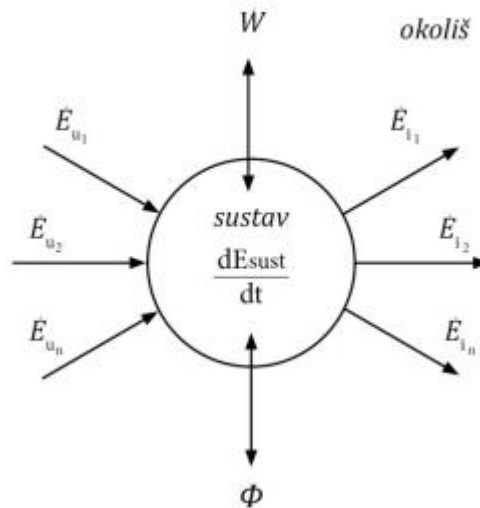
Slika 7. Termodinamički sustav [4]

Tablica 1. Podjela termodinamičkih sustava [4]

S obzirom na izmjenu radnog fluida		S obzirom na promjenjivost granica		S obzirom na izmjenu topline sustava i okoliša	
Zatvoreni sustav	Otvoreni sustav	Sa vremenski promjenjivim granicama	Sa vremenski nepromjenjivim granicama	Toplinski izoliran sustav	Toplinski ne izoliran sustav

## 2.2.6. Zakon o održanju energije (1.GST)

Energija je konzervativno svojstvo. Ne može nestati niti iz ničega nastati, nego se samo može transformirati iz jednog oblika u drugi (Slika 8.). [5]



Slika 8. Shematski prikaz zakona o održanju energije [4]

Zakon o održanju energije glasi:

$$\left| \begin{array}{l} \text{energija koja u jedinici} \\ \text{vremena ulazi u sustav} \\ \text{kroz njegovu granicu} \end{array} \right| - \left| \begin{array}{l} \text{energija koja u jedinici} \\ \text{vremena izlazi iz sustava} \\ \text{kroz njegovu granicu} \end{array} \right| = \left| \begin{array}{l} \text{vremenskoj promjeni} \\ \text{energije vezane na masu} \\ \text{unutar sustava} \end{array} \right|$$

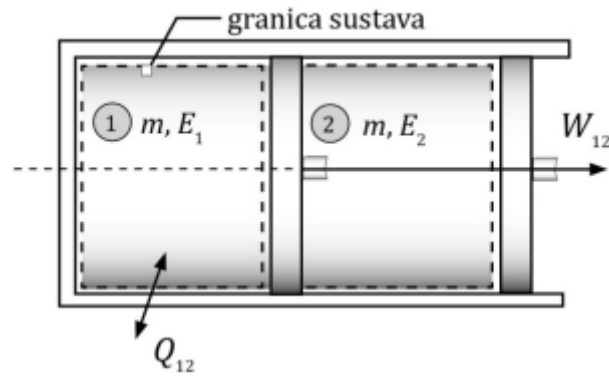
Koji se može matematički zapisati:

$$\Phi = W_{tot} + \sum_I \dot{E} - \sum_U \dot{E} + \frac{dE_{SUST}}{dt} \quad (3)$$

### 2.2.7. Zatvoreni sustav

Kod zatvorenog sustava (slika 9.) nema prolaska mase kroz granicu sustava, odnosno maseno stacionarno stanje

$$\frac{dm}{dt} = 0 \quad (4)$$



Slika 9. Zatvoreni sustav [4]

Stanje 1 – početno stanje sustava

Stanje 2 – krajnje stanje sustava

Kod zatvorenih sustava rad se naziva mehaničkim radom i računa se po formuli:

$$W_{1,2} = \int_1^2 p dV \quad (5)$$

Formula za proračun topline:

$$\Phi = W + \frac{dE_{sust}}{dt} \quad (6)$$

$$\frac{\delta Q}{dt} = \frac{\delta W}{dt} + \frac{dE_{sust}}{dt} \quad (7)$$

$$Q_{1,2} = W_{1,2} + (E_2 - E_1) \quad (8)$$

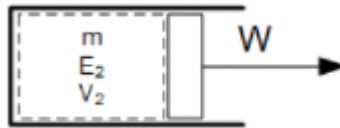
Za zatvoreni sustav vrijedi:

$$E=U \quad (9)$$

Iz čega slijedi

$$Q_{1,2} = W_{1,2} + (U_2 - U_1) \quad (10)$$

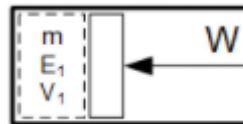
Ekspanzija – rad nastaje iz energije radnog fluida (slika 10.)



Slika 10. Ekspanzija [4]

Dolazi do širenja volumena. Rad se odvodi iz sustava potiskivanjem vanjskog sudionika. Dovođenje topline. Rad je pozitivan.

Kompresija – dovođenje rada izvana (slika 11.)



Slika 11. Kompresija [4]

Stlačivanje ili smanjenje volumena. Vanjski sudionik potiskuje radnu tvar i njoj predaje rad. Rad je zatim negativan.

#### 2.2.8. Kružni procesi (Ciklusi)

Toplinski spremnik je zapravo spremnik energije radnog fluida (npr. zrak, ocean...).

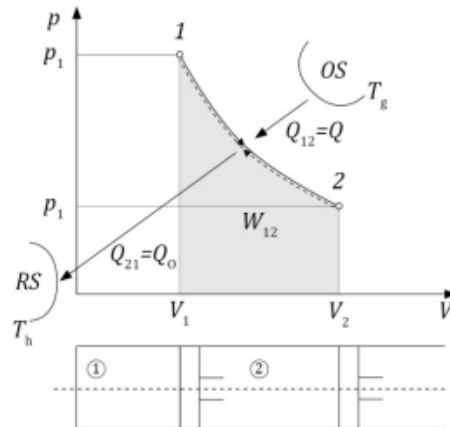
Ogrjevni spremnik (OS) je spremnik iz kojeg se uzima toplina (energija) i predaje se radnom fluidu u sustavu kojeg analiziramo.

Rashladni spremnik (RS) je spremnik energije kojem se predaje toplina putem radnog medija promatranog u sustavu.

Toplina se sama od sebe uvijek prenosi sa tijela više temperature na tijelo niže temperature.

Trajno dobivanje dinamičkog rada ostvaruje se ako radnu tvar (sustav) ponovno vratimo u početno toplinsko stanje, ali ne po istim linijama promjene stanja već po drugačijim, ali na način da zatvore ciklus u p-V dijagramu, odnosno da dobijemo zatvorenu liniju.

Razlikujemo desnokretne i ljevokretne cikluse.



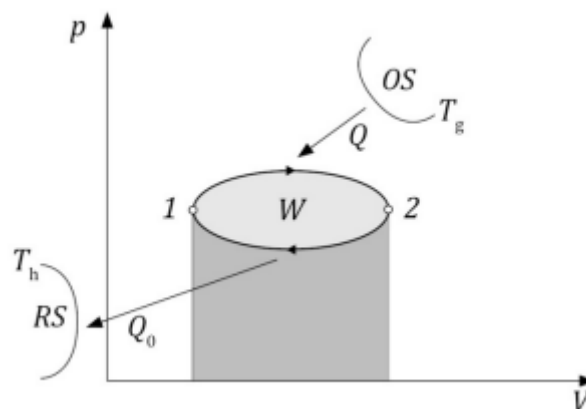
Slika 12. Prikaz kružnog procesa [4]

#### 2.2.8.1. Desnokretni Kružni proces

Desnokretni ciklus (slika 13.) se odvija u  $p, V$  dijagramu u smjeru kazaljke na satu, a ukupni korisni rad je pozitivan.

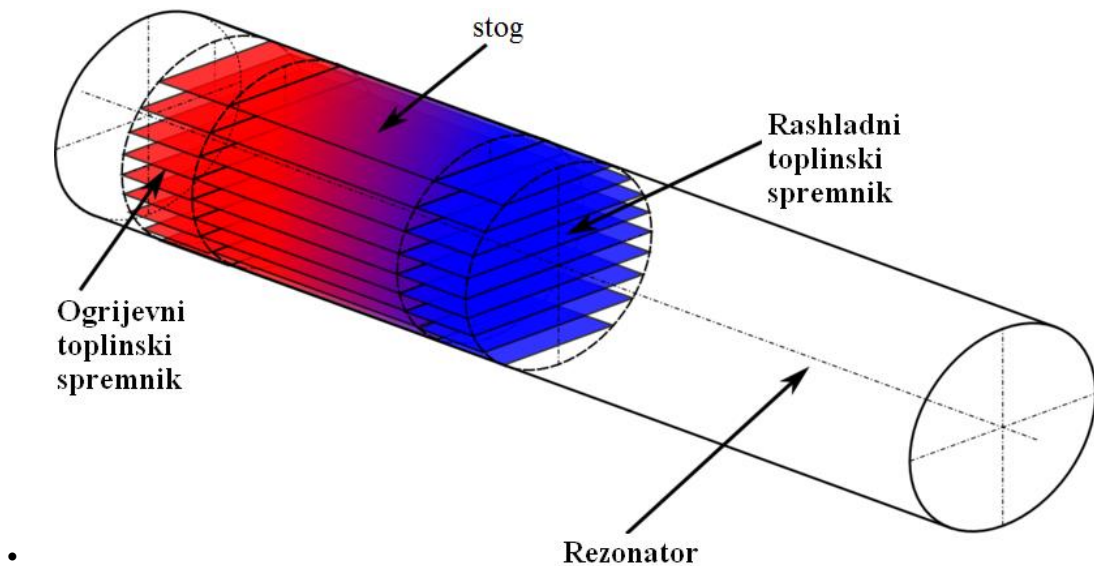
Strojevi koji rade po desnokretnom ciklusu služe za konstantno dobivanje rada i nazivaju se toplinski strojevi. Oni pretvaraju energiju radnog fluida u koristan rad.

Primjeri takvih strojeva su: motori s unutrašnjim izgaranjem (Otto, Diesel), motori s vanjskim izgaranjem (Stirlingov motor), ciklus plinske turbine, ciklus parne turbine, kombi ciklus... [4]



Slika 13. Prikaz desnokretnog kružnog procesa [4]





Slika 15 Termoakustički uređaj [6]

#### 2.4. Komponente termoakustičkog stroja

Stog - jezgra termoakustičkog stroja. Isti se sastoji od redova usko postavljenih kanala (porozni element) pomoću kojih je dobiven temperaturni gradijent.

Pozicioniran je u uskoj cijevi koja može biti otvorena na jednom ili na oba kraja.

Rezonator - uređaj koji podražajima određenih frekvencija dovodi u pobuđeno stanje (npr. titranje)

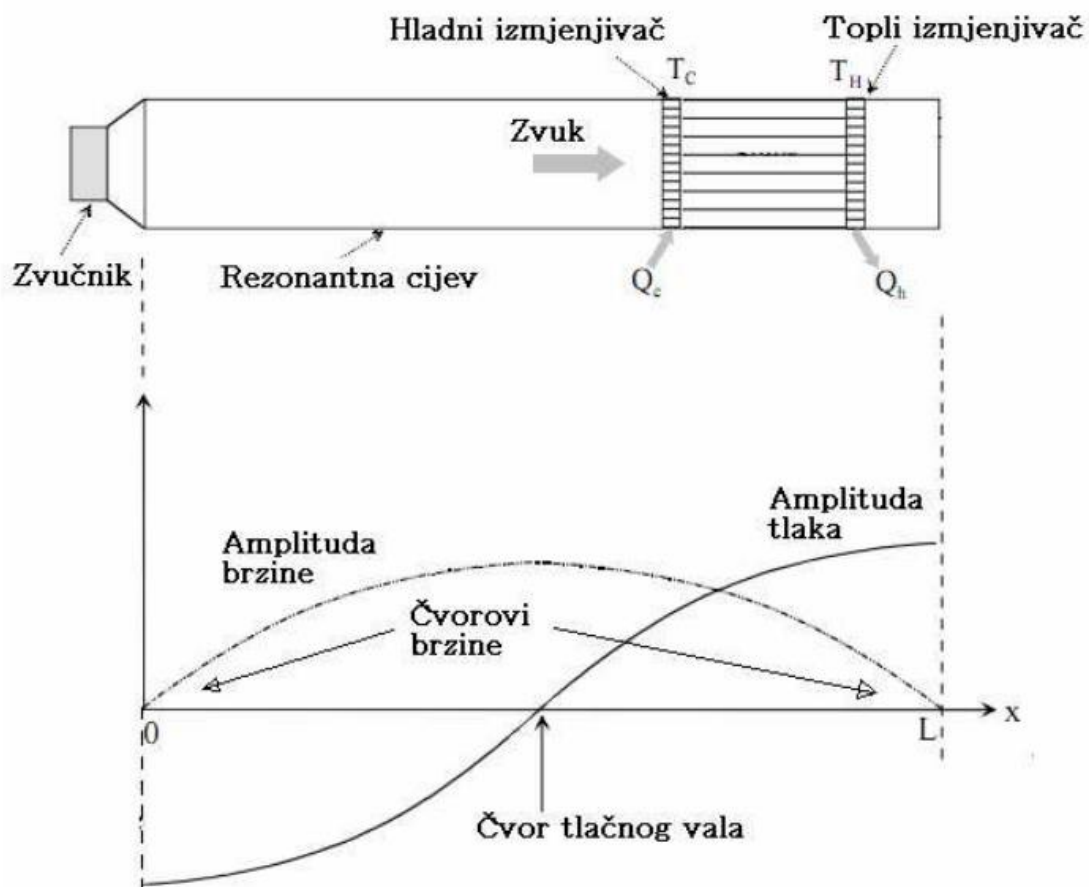
Ogrijevni toplinski spremnik - spremnik od kojeg se uzima toplina

Rashladni toplinski spremnik - spremnik kojem se predaje toplina

Radni fluid – stlačeni plin u rezonantnoj cijevi

## 2.5. Akustička frekvencija i duljina rezonantne cijevi

Učestalost akustičkog stojnog vala određena je vrstom plina, rubnim uvjetima te duljinom rezonantne cijevi. Duljina rezonantne cijevi može biti jednaka četvrtini ili jednoj polovini valne duljine. Ako je rezonantna cijev jednaka duljini jedne četvrtine valne duljine, na jednom kraju se nalazi čvor tlaka dok je na drugom čvor brzine. Zatvoreni kraj određuje čvor brzine, dok čvor tlaka mora biti na otvorenoj strani. Kod rezonantne cijevi jednake duljini pola valne duljine (Slika 16.), zatvorena su oba kraja cijevi. To nam rezultira nastankom čvora tlaka na sredini, a na krajevima nastaju čvorovi brzine. [7]



Slika 16. Raspored tlaka i brzine u rezonantnoj cijevi termoakustičkog hladnjaka [7]

Odnos između duljine rezonantne cijevi  $L$  i akustičke frekvencije  $f$  :

$$L = \frac{c}{2f} - \text{za poluvalnu rezonantnu cijev} \quad (11)$$

$$L = \frac{c}{4f} - \text{za četvrtvalnu rezonantnu cijev} \quad (12)$$



$c$  - predstavlja brzinu zvučnog vala koja je određena jednačinom:

$$c = \sqrt{\frac{\kappa \cdot R_m \cdot T}{M}} \quad (13)$$

Gdje je:

$\kappa$  - izentropski eksponent

$R_m$  - molarna plinska konstanta

$T$  - termodinamička temperatura

$M$  - molarna masa plina

Gustoća snage termoakustičkih uređaja je proporcionalna akustičkoj frekvenciji, gdje više frekvencije imaju prednost, dok se niže frekvencije koriste za pretvorbu zvučnih valova u mehaničke vibracije. Dubina toplinskog prodiranja  $\delta_k$  je prvi sljedeći utjecajan faktor na izbor frekvencije, a obrnuto je proporcionalan korijenu frekvencije drugog reda. Znači da veće frekvencije zahtijevaju manji razmak između površina poroznog elementa i kompliciraju njegovu izradu.

$$\delta_k = \sqrt{\frac{2a}{\omega}} \quad (14)$$

gdje je

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (15)$$

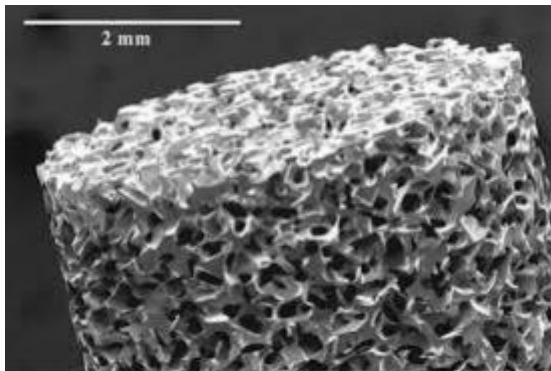
Navedena udaljenost se može izraziti kao udaljenost na koju toplina može difundirati u vremenu  $\frac{2\pi}{\omega}$ .

## 2.6. Srednji tlak

Gustoća snage termoakustičkih uređaja proporcionalna je srednjem tlaku  $p_m$ , što znači da uređaj mora raditi na najvećem mogućem tlaku koji dopušta čvrstoća konstrukcije. Dubina toplinskog prodiranja  $\delta_k$  obrnuto je proporcionalna korijenu srednjeg tlaka što rezultira malom dubinom prodiranja te zahtijeva smanjenje udaljenosti u stogu.

## 2.7. Materijal poroznog elementa (stoga)

Provođenje topline kroz stog u aksijalnom smjeru ima negativan utjecaj na djelovanje uređaja, unatoč tome potrebno je izabrati materijal koji ima što manji koeficijent toplinske vodljivosti. Toplinski kapacitet stoga mora biti veći od toplinskog kapaciteta radnog fluida kako bi temperatura stoga bila stacionarna. Ovisno za što se uređaj koristi, materijal stoga mora biti otporan na visoke temperature te biti u stanju dobro apsorbirati toplinsko zračenje. Porozni elementi najčešće se izrađuju od keramičkih materijala, nehrđajućeg čelika, metalnih pjena (slika 17.), a mogu se koristiti i polimerni materijali (slika 18.) ukoliko temperature to dopuštaju. [1]



Slika 17. Struktura metalne pjene [8]



Slika 18. PVC – polimerne pjene [8]

## 2.8. Princip rada

Proizvodnja akustičkih valova pomoću prijenosa topline se dobiva putem rezonancije cijevi. Može biti sa zatvorenim jednim krajem ili sa otvorena oba kraja.

Kod zatvorenog jednog kraja se javljaju oscilacije koje su poznatije pod nazivom Sondhaussove oscilacije.

Zagrijavanje počinje na zatvorenom kraju cijevi.

Sa povećanjem temperature se toplina u molekulama plina pri dnu pretvara u kinetičku energiju.

Kretanje molekula plina od toplijeg prema hladnijem dijelu se ubrzava te tako na zagrijanom dnu tvori područje niskog tlaka.

Prilikom kretanja molekula sa toplijeg prema hladnijem dijelu, dolazi do pomjeranja klipa prema van (ekspanzija).

Kod hlađenja tih molekula, preostale molekule plina ubrzavaju prema toplijem kraju cijevi te tako popunjuju područje niskog tlaka.

Kod kretanja molekula sa hladnijeg dijela prema toplijem, dolazi do pomjeranja klipa prema unutra (kompresija).

Proces počinje ispočetka kada molekule ponovo stignu u područje niskog tlaka te se počinju zagrijavati.

Tako smo dobili zatvoreni krug toplinskih oscilacija.

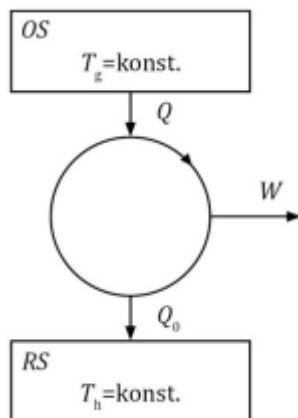
## 2.9. Podjela

Kao i drugi toplinski strojevi, tako se i termoakustički strojevi dijele na desnokretne (motore) i lijevokretne (pumpe).

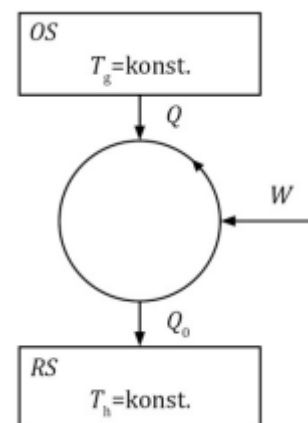
Desnokretnim uređajima (slika 19.) dovodimo toplinu. Dio opskrbe toplinom pretvara se u mehaničku energiju, a ostatak topline se odvodi kroz izmjenjivač topline. Dobivena mehanička energija je u obliku akustičkih oscilacija, koje se mogu pretvoriti u električnu energiju ili upotrijebiti za pogon lijevokretnih termoakustičkog uređaja.

Ljevokretnim termoakustičkim (slika 20.) uređajima dovodi se mehanička energija u obliku akustičkih oscilacija preko klipnog mehanizma, zvučnika ili desnokretnog termoakustičkog uređaja. Mehanička energija izaziva prijenos topline sa hladnijeg izmjenjivača na topliji, što je osnova termoakustičkog hladnjaka ili dizalice topline.

[4]



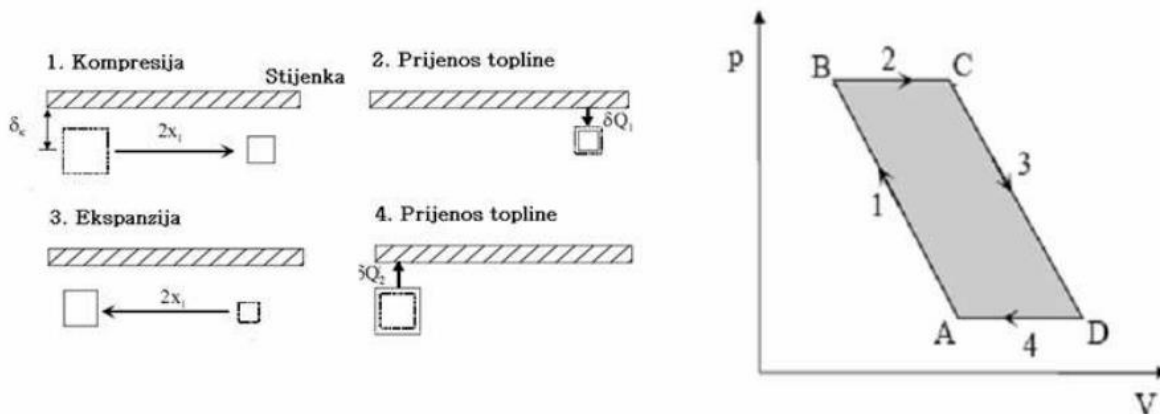
Slika 19. Shema toplinske pumpe [4]



Slika 20. Shema rashladnog stroja [4]

## 2.10. Termoakustički motor

Kod stvorenog temperaturnog gradijenta na poroznom materijalu prilikom kojeg se na jednom kraju dovodi toplina  $Q_H$ , a na drugom odvodi  $Q_C$ , stvaraju se te održavaju akustičke oscilacije na sljedeći način:



Slika 21. Pojednostavljeni desnokretni termoakustički ciklus [4]

1. Zvučni val komprimira česticu što za posljedicu ima pomak čestice u zonu više temperature stijenke te zbog toga dolazi do porasta temperature.
2. Ukoliko je duž stijenke temperaturni gradijent dovoljno velik, dolazi do preuzimanja topline od još toplije stijenke
3. Zvučni val pomiče česticu do zone gdje je manja temperatura stijenke te se pri tom pomaku čestici smanjuje temperatura i povećava volumen.
4. Na početnom položaju dolazi do predaje topline sa čestice na hladniju stijenku te završava jedan krug ciklusa.

Dovođenje topline komprimiranoj čestici, što za rezultat ima povećanje njene temperature te odvođenje topline od ekspanzirane čestice, što za rezultat ima smanjenje njene temperature, rezultira istim učinkom koji bi imao jači zvučni val. Na opisan način duž stijenke veliki temperaturni gradijent podržava to jest pojačava zvučne valove. Navedeni termodinamički ciklus odgovara Stirlingovom ciklusu, kod kojeg ulogu oba klipa Stirlingova motora preuzima akustički val. Na navedeni način je moguće stvoriti i pojačati zvučne valove koji predstavljaju jedan oblik mehaničke energije. [4]

Dobiveni rad:

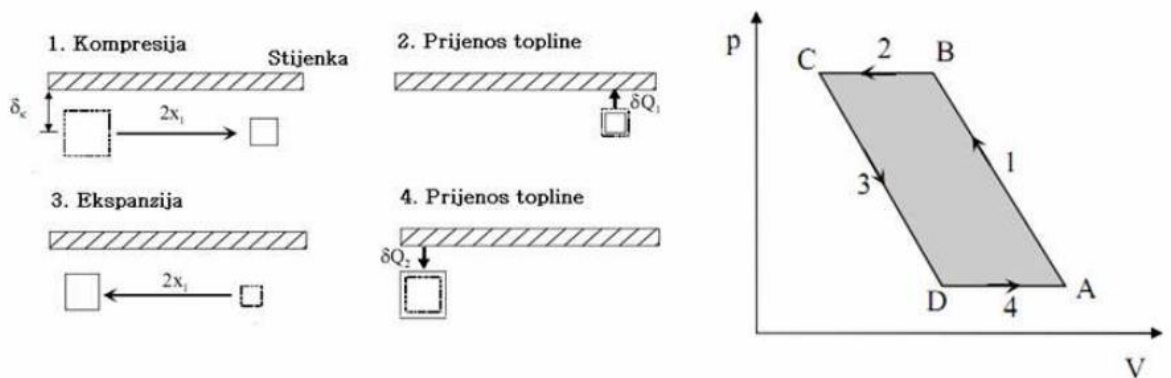
$$W = Q_H - Q_C \quad (16)$$

Termodinamički stupanj iskoristivosti:

$$\eta = \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_C}{Q_H} \quad (17)$$

### 2.11. Termoakustičke pumpe

Toplinska pumpa ima zadatak odvesti toplinu  $Q_C$  iz hladnijeg spremnika temperature  $T_C$  te isto tako dovesti toplinu  $Q_H$  na topliji spremnik temperature  $T_H$ . Za ostvarenje ovog procesa je potrebno dovesti mehanički rad  $W$ . Grijalice i hladnjaci (slika 22.) imaju različitu svrhu. Za održavanje nekog prostora na temperaturi ispod okolišne temperature služi hladnjak, dok za održavanje prostora na temperaturi višoj od okolišne služi grijalica. Termoakustička toplinska pumpa je sastavljena od identičnih dijelova kao i motor, ali se razlikuje po tome što se termoakustičkoj toplinskoj pumpi mehanička energija dovodi u obliku akustičkih valova, a temperaturni gradijent nastaje na stijenci poroznog elementa (stoga). [4]



Slika 22. Pojednostavljeni lijevokretni termoakustički ciklus [4]

1. Zvučni val komprimiranjem ujedno i pomiče česticu te zbog toga dolazi do porasta temperature
2. Čestica predaje toplinu stijenci
3. Zvučni val ekspanzira i pomiče česticu natrag na prvobitni položaj te pri tome dolazi do pada temperature
4. Čestica preuzima toplinu sa stijenske i time završava jedan krug ciklusa

Matematički zapis dovedene topline grijanom prostoru:

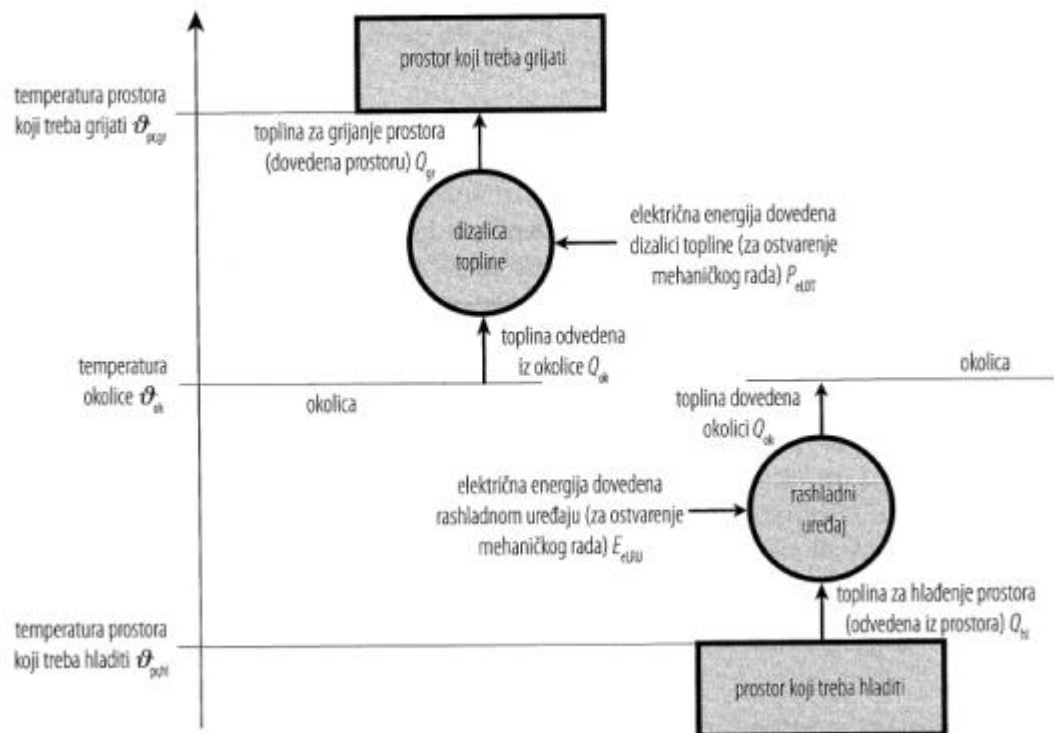
$$Q_H = W + Q_C \quad (18)$$

Tablica 2. Faktori za ocjenu efikasnosti ljevakretnih sustava [4]

Rashladni uređaji	Toplinske pumpe
$\beta_R = -\frac{Q}{W}$	$\beta_H = \frac{Q_0}{W}$

## 2.12. Razlika između dizalice topline i hladnjaka

Toplinski spremnik kojem se toplina dovodi kod rashladnog uređaja je neposredna okolina uređaja, dok je hlađeni prostor (zrak u prostoriji, hladnjak) spremnik kojem se toplina odvodi. [4]



Slika 23. Usporedba procesa u rashladnom uređaju i dizalici topline [4]



## 2.13. Dosadašnja ostvarenja i primjeri

Razvoj prvih praktičnih termoakustičkih uređaja nastaje početkom osamdesetih na Los Alamos National Laboratory (LANL). Akustična toplinska pumpa (hladnjak) koja je prva razvijena na LANL-u je koristila zvučnik na jednom kraju zatvorene cijevi za pokretanje rezonantne cijevi te hrpu staklenih ploča od staklenih vlakana na drugom kraju.

Termoakustika kao novi oblik toplinskih pumpi i motora je dobila veliku pozornost te su tada počela brojna istraživanja. Većina termoakustičkih uređaja napravljena je na LANL, Pennsylvania State University i NPS (Naval Postgraduate School). Dva primjerka termoakustičkih hladnjaka izvedena su na NPS-u. Jedan od njih se naziva STAR, a drugi SETAC.

### 2.13.1. STAR

Svemirski termoakustički hladnjak (STAR – The Space Thermoacoustic Refrigerator), koji je dizajniran za proizvodnju do 80K temperaturne razlike, te za pumpanje do 4W topline. STAR (slika 24.) je lansiran na svemirskom objektu Discovery (STS-42) 1992. godine.

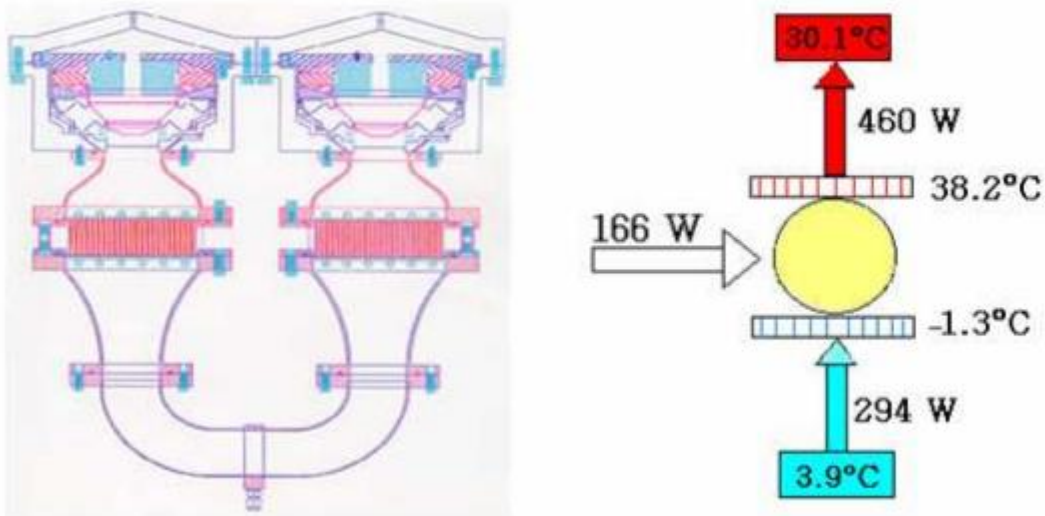


Slika 24. STAR [8]

STAR je stroj s putujućim valovima, koji se sastoji od dugog četvrtvalnog rezonatora spojenog na petlju u koju je smješten regenerator (frekvencija auto-oscilacija generiranog vala je takva da valna duljina odgovara približno 4 puta duljini ravni vodič. [8]

### 2.13.2. SETAC

Druga izvedba je Shipboard Electronics ThermoAcoustic Cooler (SETAC) koji se koristio za hlađenje radarske elektronike na brodu ratnog broda USS Deyo 1995. Dizajniran je da osigura 400W rashladne snage za mali raspon temperatura, što je slično kao domaći sustav hladnjaka/zamrzivača (slika 25). [8]

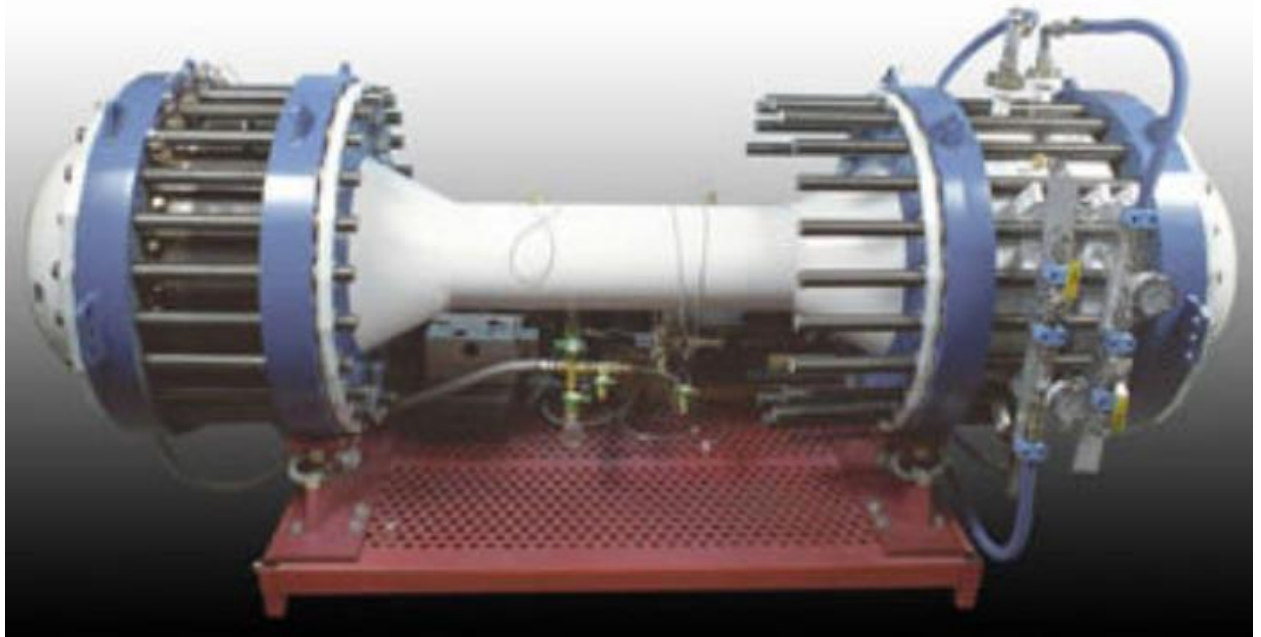


Slika 25. Presjek i tokovi rada i topline [8]

## 2.13.3. TRITON

Na Državnom sveučilištu Pennsylvania razvija se veliki hladnjak nazvan TRITON (slika 26.) koji će hladiti brodove mornarice. Namjerava se proizvesti rashladna snaga od 10kW što znači da može pretvoriti tri tone vode pri 0 °C u led pri istoj temperaturi u jednom danu.

Radi na principu stojnog vala te ima dizajn duplog rezonatora koji omogućava povećanje kapaciteta hlađenja. Ista ima izlaz hlađenja što je pogodno za male tvrtke. [9]



Slika 26. TRITON [9]

## 2.13.4. TAR

Dosadašnja istraživanja termoakustike na Sveučilištu u Adelaideu rezultirala su konstrukcijom pokaznog termoakustičkog hladnjaka (TAR) sposobnog za rad na heliju ili zraku (slika 27.). Korištenjem jednostavnog zvučnika, intenzivni zvučni valovi su višak te stvaraju zvučni tlak od 180 decibela unutar hladnjaka, održavajući temperaturu 12 °C ispod temperature okoliša sa samo 700 kPa (7 bara) komprimiranog zraka. [8]



Slika 27. Termoakustički hladnjak (TAR) [10]

### 2.13.5. Termoakustički generator električne energije

Termoakustični generator električne energije putujućih valova novi je uređaj s vanjskim izgaranjem koji može pretvoriti toplinu, poput sunčeve energije, u električnu.

Sustav se sastoji od termoakustičkog generatora električne energije putujućih valova, solarnog kolektora i prijemnika topline. [12]

Solarna termoakustična tehnologija (slika 28.) potencijalno je pouzdanija od ostalih motora zasnovanih na Stirlingu i obećava da će biti 25% jeftiniji za rad od takvih sustava koji koriste konvencionalna goriva. [13]



Slika 28. Solarni termoakustički stroj [12]



## 2.14. Stirlingov motor

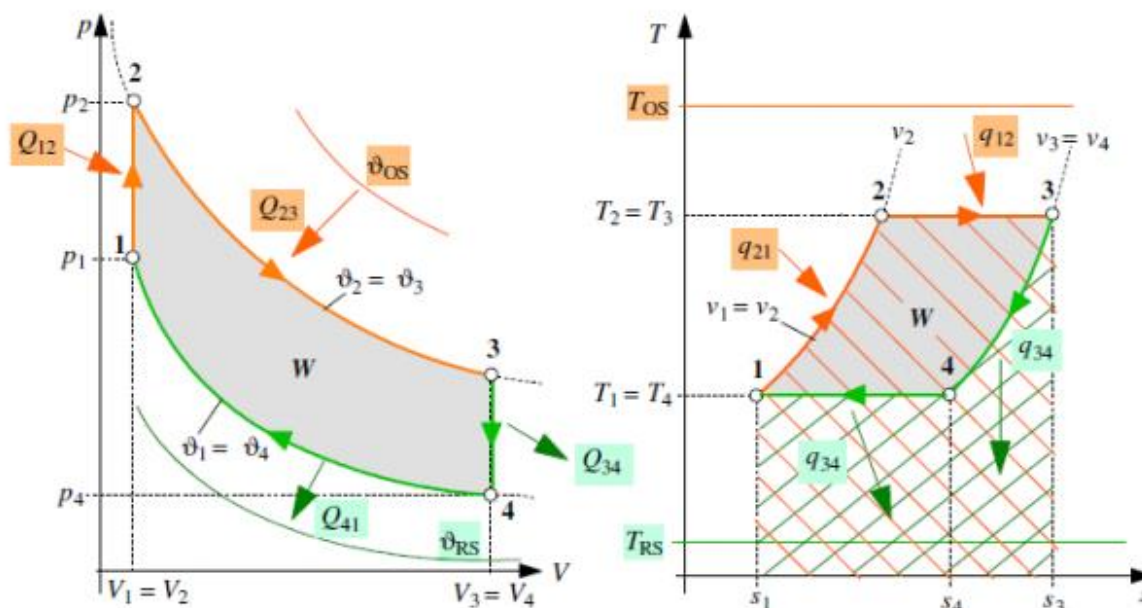
Stirlingov motor je toplinski motor u kojem se radno tijelo u obliku plina ili tekućine kreće u ograničenom volumenu, vrsta motora s vanjskim izgaranjem. Temelji se na periodičnom zagrijavanju i hlađenju radne tekućine za oporabu energije koja proizlazi iz promjena u volumenu radne tekućine. Može raditi ne samo od izgaranja goriva već i od bilo kojeg izvora topline. [11]

Osnovni princip rada Stirling motora je naizmjenično zagrijavanje i hlađenje radne tekućine, npr. plin u zatvorenoj boci. Poznato je da se kod zagrijavanja plina njegov volumen povećava, a hlađenjem se smanjuje. Ovo svojstvo plinova je osnova rada motora. [11]

Na temelju periodičnog zagrijavanja i hlađenja radne tekućine s ekstrakcijom energije koji proizlaze iz promjena u volumenu radne tekućine.



Slika 29. Termoakustički Stirlingov stroj [11]



Slika 30. Stirlingov proces u p-V i T-s dijagramu [11]

Izohorno dovođenje topline (1-2): plinu se dovodi toplina  $Q_{12}$  uz konstantan volumen  $V_1=V_2$

Izotermna ekspanzija plina (2-3): ekspanzija plina pri konstantnoj temperaturi  $T_2=T_3$  rezultira povećanje volumena prilikom dovođenja topline  $Q_{2,3}$  iz ogrijevnog spremnika.

Izohorno odvođenje topline (3-4): plinu se odvodi toplina  $Q_{2,3}$  uz konstantan volumen  $V_3=V_4$

Izotermna kompresija plina (4-1): komprimiranje plina pri konstantnoj temperaturi  $T_4=T_1$  rezultira smanjenje volumena prilikom odvođenja topline  $Q_{4,1}$  u rashladni spremnik.

### **3. POSTAVKA ZADATKA**

Potrebno je konstruirati termoakustički motor.

Konstruiranje se mora vršiti u CAD programu.

Izraditi sklopni i radioničke crteže.

Radioničke crteže priložiti uz rad zajedno sa sklopnim crtežom.

Nakon konstruiranja sastaviti i pokrenuti termoakustički motor.

Izmjeriti dobivene vrijednosti ukoliko imate mjerni instrument.

Analizirati dobivene rezultate.

Navesti zaključak.



## 4. PRAKTIČNI DIO

Na temelju znanja i vještina koje sam stekao tokom školovanja na veleučilištu, te spoznaja prilikom pisanja završnog rada, izradio sam termoakustički motor.

Odabrao sam izradu termoakustičkog Stirlingovog motora iz razloga što je najjednostavniji za izradu praktičnog dijela te je većina komponenti, od kojih je sastavljen minijaturni stroj, zapravo iz svakodnevnih primjene pa ih je bilo jednostavno nabaviti.

### 4.1. Nosač

Nosač sam izradio od dva dijela. Prvi dio nosača je lim koji sam savio pod pravim kutom na dva mjesta, dok je drugi dio (slika 31.) križni nosač ručki od trimera koji će mi služiti za prihvat cilindra. Dijelovi nosača su spojeni vijcima.



Slika 31. Drugi dio nosača



Slika 32. Spoj prvog i drugog dijela nosača

## 4.2. Klip i cilindar

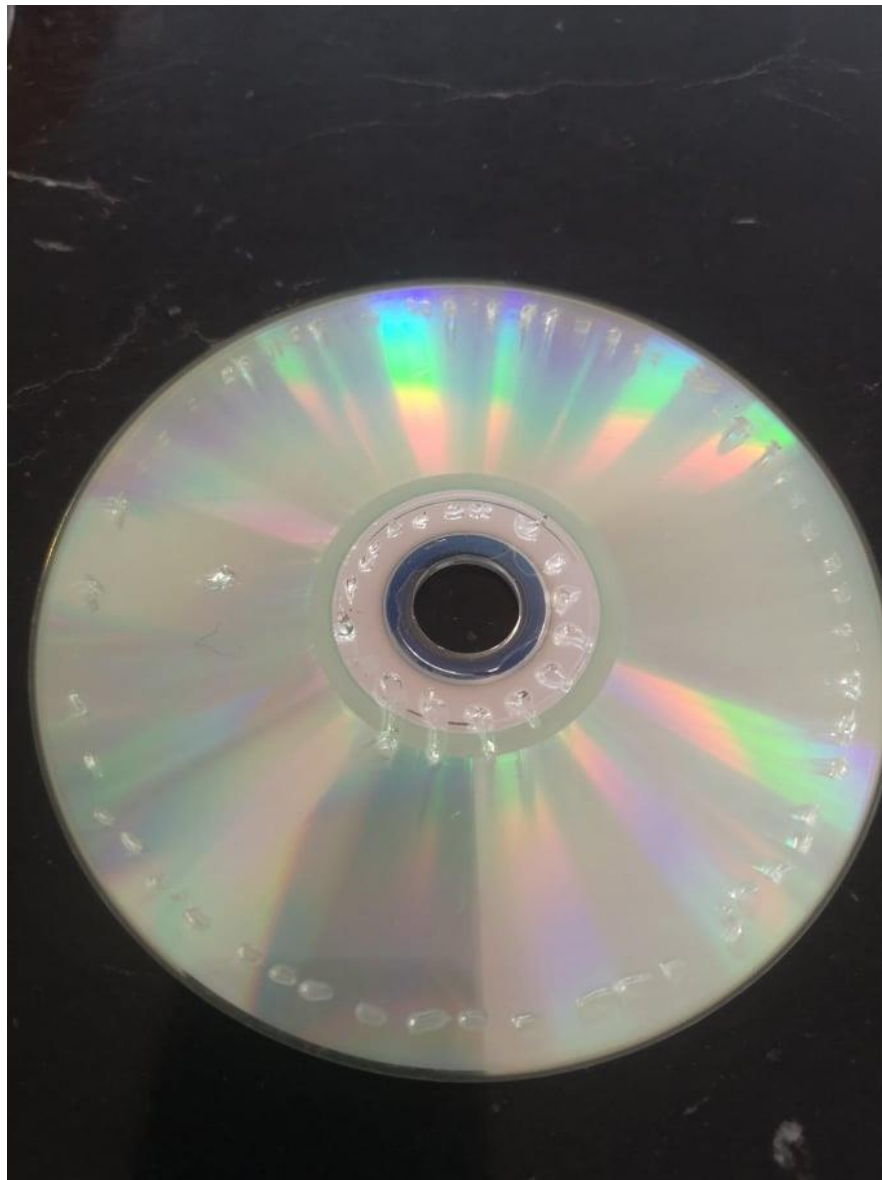
Za klip i cilindar termoakustičkog stirlingovog motora sam odabrao staklenu špricu (injekciju). Vanjski promjer klipa iznosi 19 mm, dok je unutarnji promjer cilindra 19,5 mm. Klip sam prošao sa grafitnom olovkom kako bi dobio manje trenje između klipa i cilindra te ujedno lakši i efikasniji rad stroja.



Slika 33. Klip i cilindar

### 4.3. Radno kolo

Radno kolo sam izradio od 6 CD diskova koje sam međusobno povezo super ljepilom. Sljedeće što sam uradio je bilo da sam radno kolo podijelio na 5 jednakih dijelova te sam izbušio rupe za klipnjaču na različitim promjerima. Promjeri na kojima sam bušio rupe su 12mm, 15mm, 18mm, 21mm, 24mm. Nakon centriranja sam sa stražnje strane radnog kola pomoću vrućeg ljepila pričvrstio ležaj dimenzije 12x28x8.



Slika 34. Proces ljepljenja CD diskova



Slika 35. Spojeni CD diskovi u radno kolo



Slika 36. Pozicionirane rupe na radnom kolu





Slika 37. Ležaj 6001RS



Slika 38. Radno kolo



#### 4.4. Klipnjača i spojevi

Klipnjača motora je izrađena od lima. Duljina klipnjače iznosi 170 mm, a široka je 13 mm. Na krajevima sam izbušio rupe  $\varnothing 5$  za spajanje sa radnim kolom te klipom. Na klip sam morao pričvrstiti dio pomoću kojeg ću spojiti klipnjaču. Taj dio sam izradio od lima, izbušio



Slika 39. Dio za spoj klipnjače i klipa

rupu i pričvrstio vrućim ljepilom na klip. Klipnjača je spojena i na jednu i na drugu stranu pomoću vijaka te je sve podmazano silikonskim uljem.



Slika 40. Spojeni dio na klip



Slika 41. Klipnjača sa dijelovima za spoj sa radnim kolom



Slika 42. Spoj klipnjače sa radnim kolom

#### 4.5. Porozni element

Za porozni element odnosno stog sam koristio čeličnu vunu.

Pozicionirao sam ju na jednu četvrtinu ukupne duljine rezonantne cijevi iz razloga što je cijev na jednom kraju zatvorena.



Slika 43. Čelična vuna

#### 4.6. Postolje

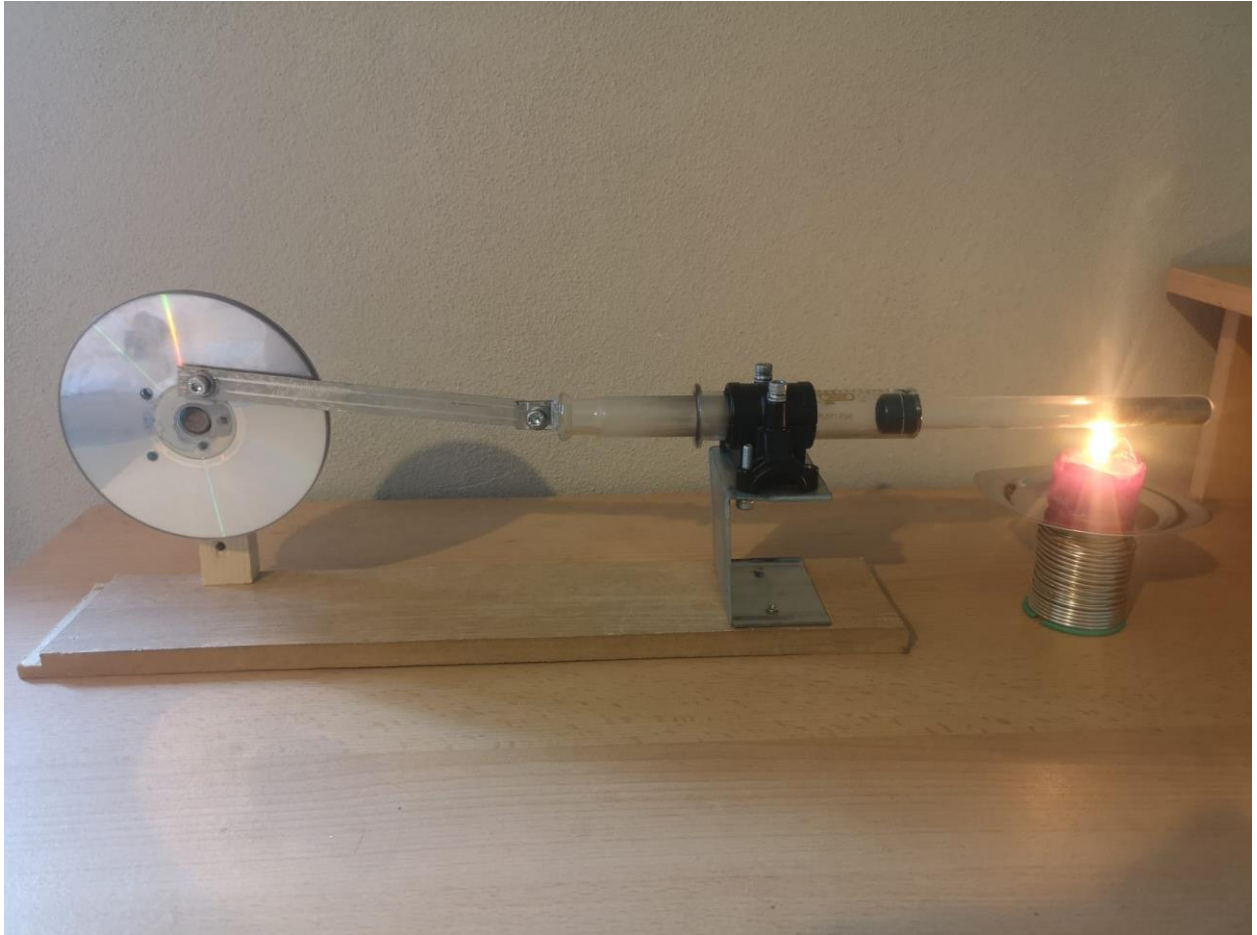
Postolje sam napravio od daske. Na nju sam vijcima pričvrstio nosač radnog kola koji je napravljen od željeznog dijela na koji je učvršćena osovina. Morao sam paziti da mi promjer osovine na koji ide radno kolo bude u ravni sa promjerom cilindra.



Slika 44. Postolje sa nosačem radnog kola

#### 4.7. Termoakustički stirlingov motor

Kad sam nabavio sve komponente, sastavio sam termoakustički Stirlingov motor (slika 45.). Radni fluid navedenog stroja je zrak (uzduh), dok izvor topline dobivamo od svijeće.



Slika 45. Termoakustički Stirlingov motor



## 5. ANALIZA REZULTATA

Da bi termoakustički Stirlingov stroj došao na radnu temperaturu te se samostalno pokrenuo potrebno je proći 9 minuta ukoliko se za pokretanje istoga koristi svijeća kao izvor topline.

Svijeća je postavljena na 1/4 ukupne duljine rezonantne cijevi.

Tlak i temperaturu unutar stroja nisam mogao izmjeriti.

Pomak klipa stroja u radu iznosi približno 40mm.

Kad se odstrani izvor topline, stroj ubrzo prestane raditi.

Optimizaciju stroja bi posligli sa drugim izvorom topline (npr. plamenik) koji bi brže zagrijao na radnu temperaturu.



## 6. ZAKLJUČAK

Iako je termoakustika kao grana znanosti već godinama poznata, svejedno se radi na tom području te se pokušavaju izvesti što učinkovitiji strojevi.

Prednost termoakustičkih strojeva je u tome što možemo koristiti obnovljive izvore energije te na taj način smanjujemo onečišćenje atmosfere, vode i tla. Također nema emisije štetnih plinova u okoliš te su gotovo neograničeni izvori energije. Mana takvih strojeva je što ovise o vremenskih prilikama.

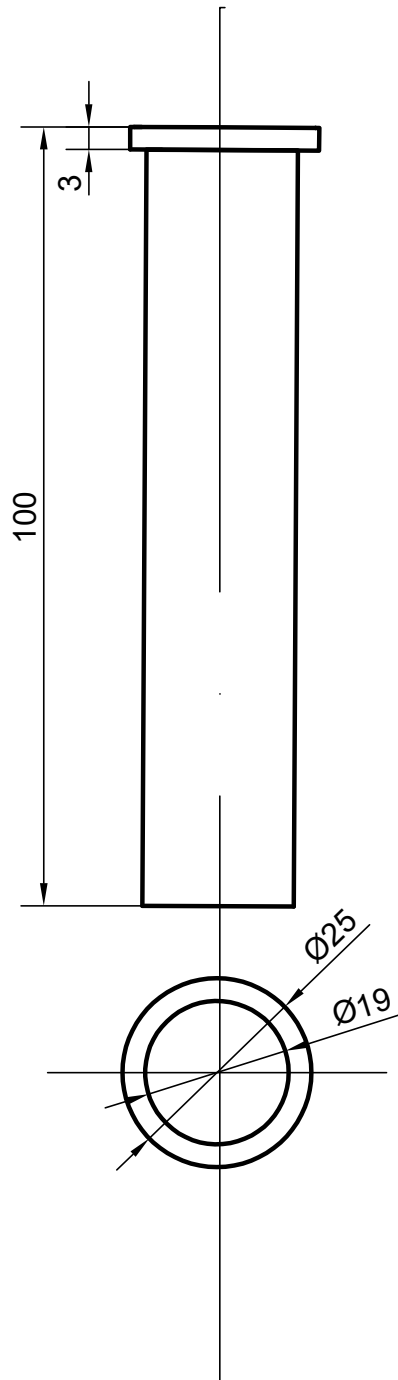
Kao što je navedeno, izuzetna prednost termoakustičkog motora je što može na solarnu energiju, bez štetnih plinova, vršiti proizvodnju električne energije.

Sve više inženjera ima na umu da treba čuvati okoliš te je sve veća popularnost obnovljivih izvora energije tako da je pred termoakustikom kao granom znanosti tek svijetla budućnost.

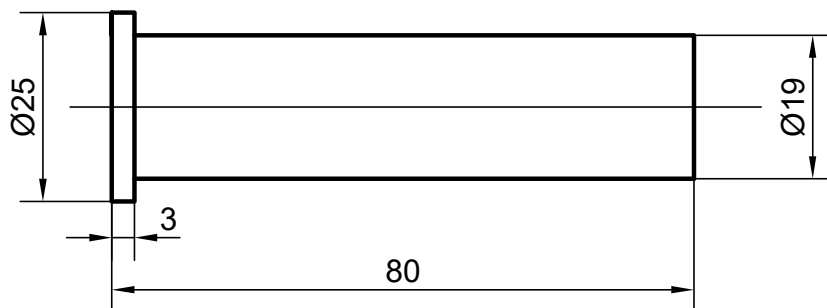
## LITERATURA

- [1] **Swift, G.W.:** Thermoacoustic engines, Acoustical Society of America, 1988
- [2] Stojni val, dostupno na: [www.enciklopedija.hr](http://www.enciklopedija.hr), pristupljeno 04.09.2021.
- [3] Rezonancija, dostupno na: [www.enciklopedija.hr](http://www.enciklopedija.hr), pristupljeno 04.09.2021.
- [4] **Galović, A.:** „TERMODINAMIKA 1“, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, (2004.), ISBN 953-6313-44-8
- [5] Unutarnja energija i toplina, dostupno na: [www.edutorij.e-skole.hr](http://www.edutorij.e-skole.hr), pristupljeno 06.09.2021.
- [6] Termoakustika, dostupno na: [hr.unionpedia.org](http://hr.unionpedia.org), pristupljeno 06.09.2021.
- [7] Akustika, dostupno na: [www.fizika.unios.hr](http://www.fizika.unios.hr), pristupljeno 06.09.2021.
- [8] <https://thermoacoustics.weebly.com/history.html>, pristupljeno 08.09.2021.
- [9] [https://www.researchgate.net/figure/Space-ThermoAcoustic-Refrigerator-Star-Penn-State-1992-La-figure-135-est-une\\_fig12\\_326504544](https://www.researchgate.net/figure/Space-ThermoAcoustic-Refrigerator-Star-Penn-State-1992-La-figure-135-est-une_fig12_326504544), pristupljeno 08.09.2021.
- [10] [https://www.researchgate.net/figure/Standing-wave-thermoacoustic-refrigerator-Source-Triton-Shipboard-Thermoacoustic\\_fig2\\_235898238](https://www.researchgate.net/figure/Standing-wave-thermoacoustic-refrigerator-Source-Triton-Shipboard-Thermoacoustic_fig2_235898238), pristupljeno 11.09.2021.
- [11] <https://sciencealpha.com/hr/stirling-engine-a-simple-and-reliable-heat-engine-with-his-own-hands-the-working-principle-of-buy-price-how-to-make-drawings-1-kw-efficiency-model-video-the-most-power-combustion-low-temperature-home/>, pristupljeno 11.09.2021.
- [12] [https://www.researchgate.net/publication/256854413\\_A\\_solar-powered\\_traveling-wave\\_thermoacoustic\\_electricity\\_generator](https://www.researchgate.net/publication/256854413_A_solar-powered_traveling-wave_thermoacoustic_electricity_generator), pristupljeno 11.09.2021.

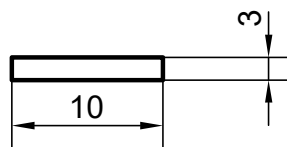
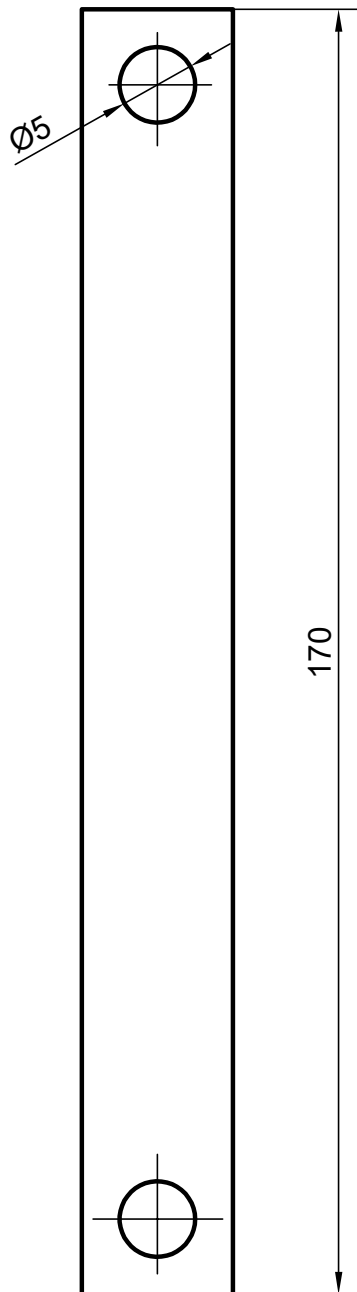
[13]<https://solarindustry.com/qnergy-demonstrates-solar-thermoacoustic-power-generation>, pristupljeno 12.09.2021.



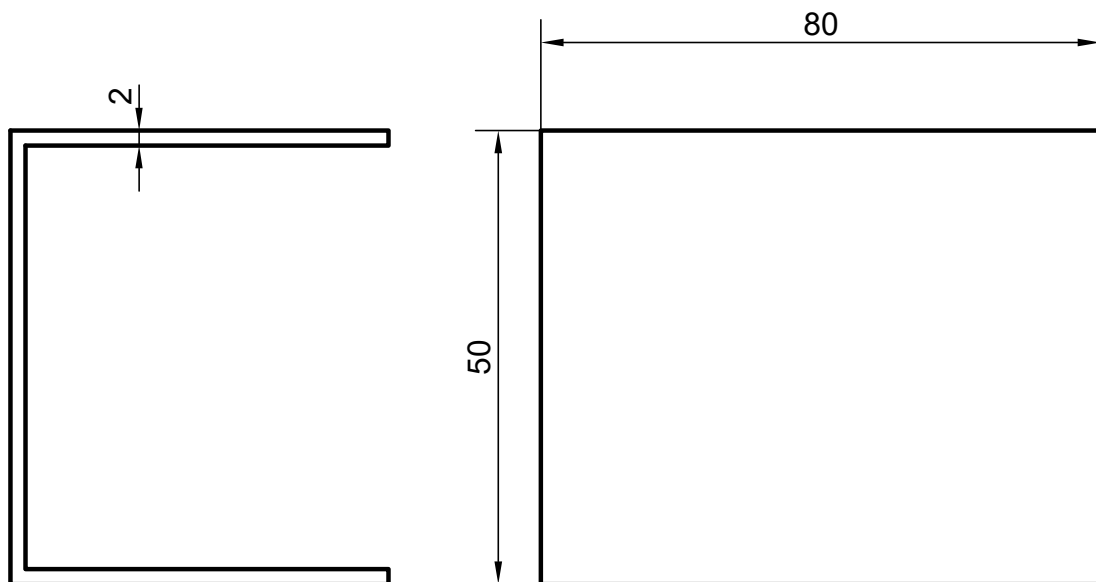
Mjerilo: 1:1	Datum: 10.10.2021.	Ime i prezime: Ivan Zorić	VELEUČILIŠTE U KARLOVCU Strojarski odjel
Pozicija: 13	Sklopni crtež (broj): SK1-1		Materijal: Staklo
Broj crteža: RC6		Naziv dijela: Cilindar	



Mjerilo: 1:1	Datum: 10.10.2021.	Ime i prezime: Ivan Zorić	VELEUČILIŠTE U KARLOVCU Strojarski odjel
Pozicija: 10	Sklopni crtež (broj): SK1-1		Materijal: Staklo
Broj crteža: RC5		Naziv dijela: Klip	



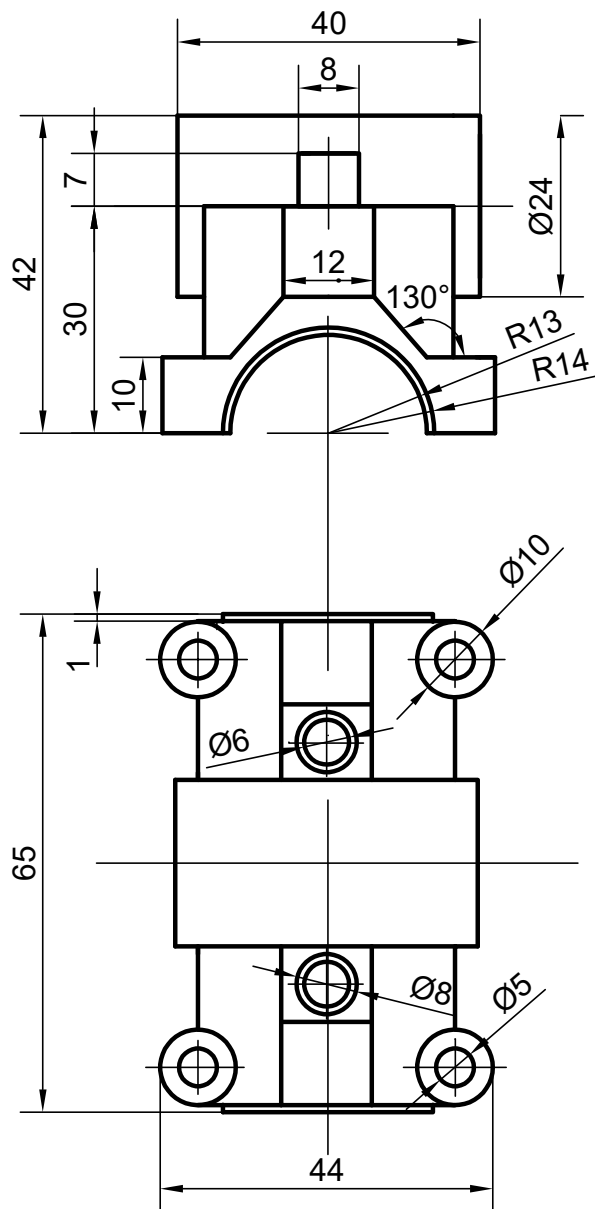
Mjerilo: 1:1	Datum: 10.10.2021.	Ime i prezime: Ivan Zorić	VELEUČILIŠTE U KARLOVCU Strojarski odjel
Pozicija: 8	Sklopni crtež (broj): SK1-1	Materijal: A653	
Broj crteža: RC3	Naziv dijela: Klipnjača		



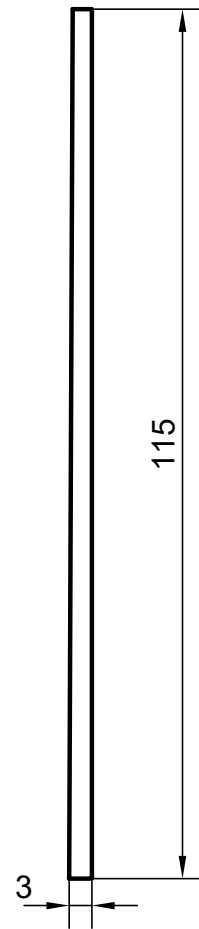
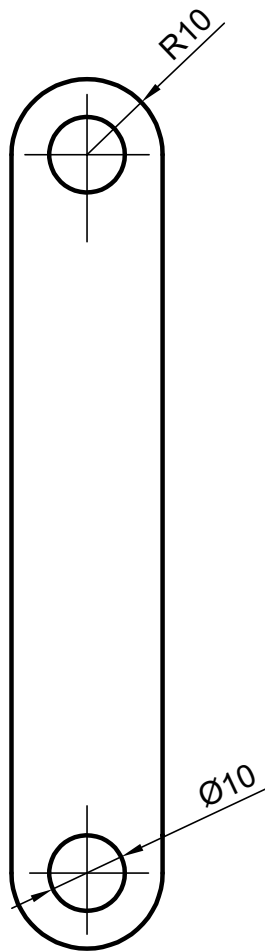
Mjerilo: 1:1	Datum: 10.10.2021.	Ime i prezime: Ivan Zorić	VELEUČILIŠTE U KARLOVCU Strojarski odjel
Pozicija: 12	Sklopni crtež (broj): SK1-1		Materijal: A653
Broj crteža: RC9		Naziv dijela: Kutni nosač	



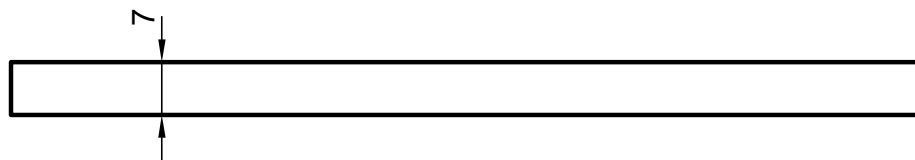
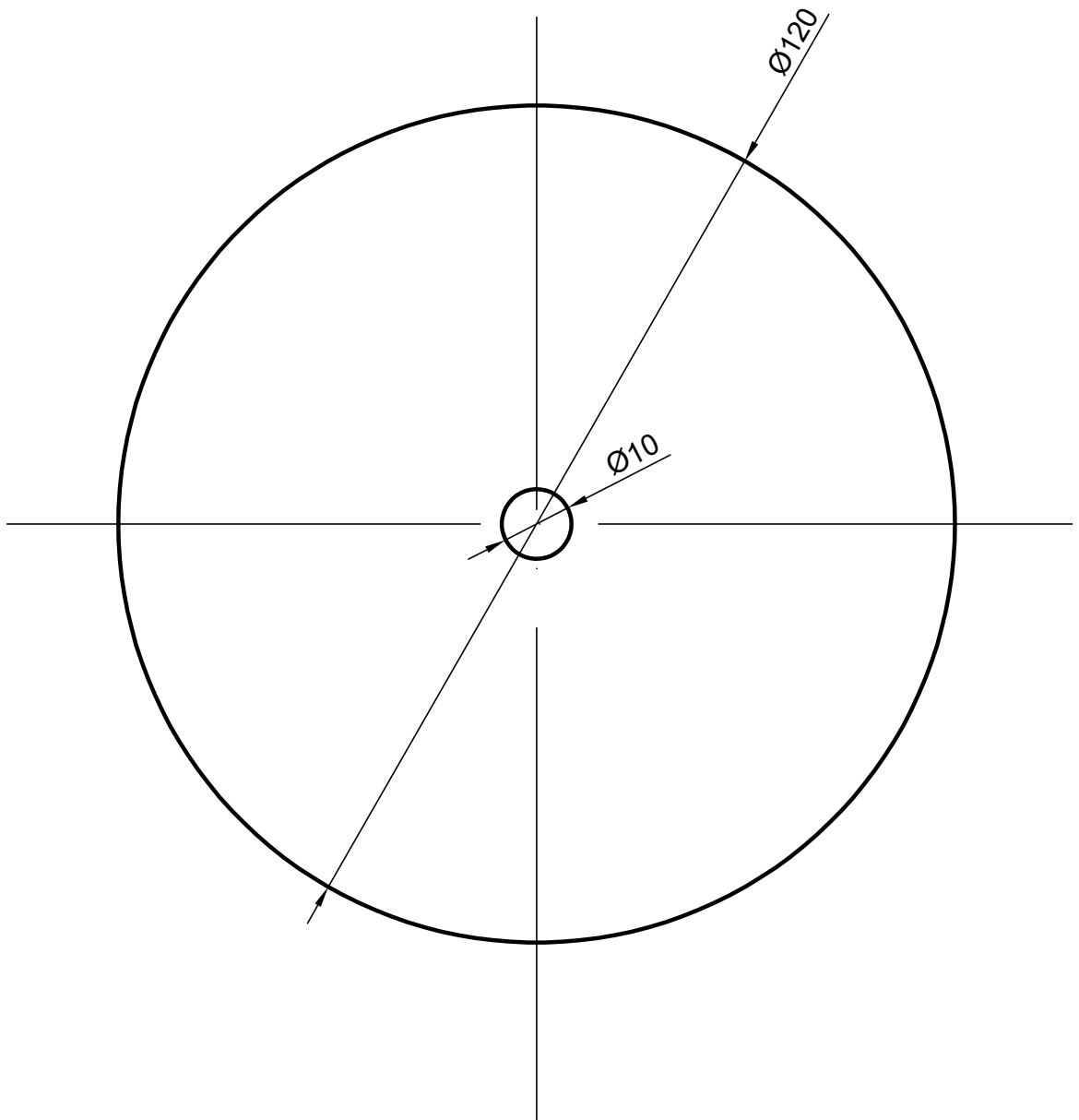




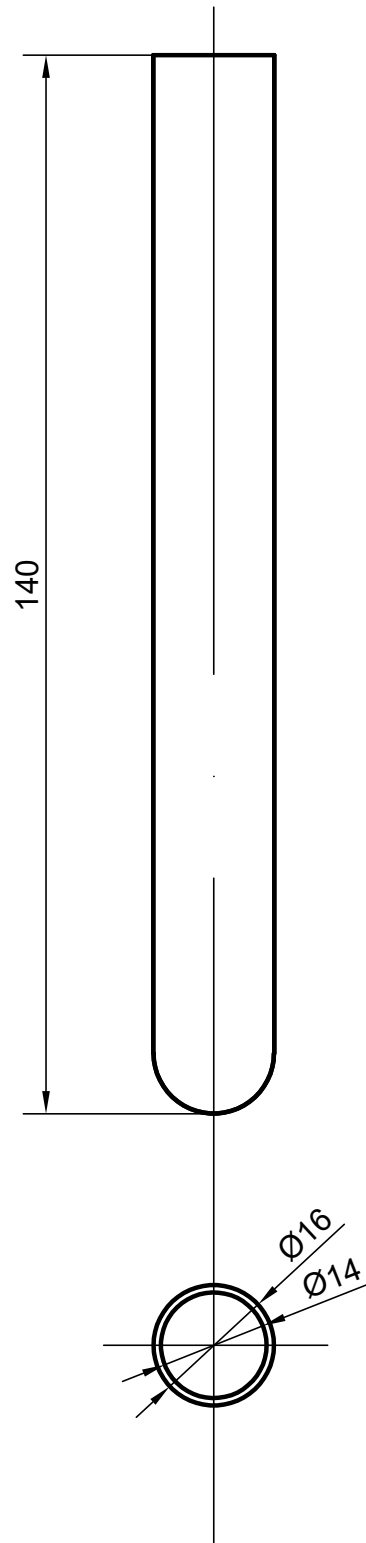
Mjerilo: 1:1	Datum: 10.10.2021.	Ime i prezime: Ivan Zorić	VELEUČILIŠTE U KARLOVCU Strojarski odjel
Pozicija: 11	Sklopni crtež (broj): SK1-1	Materijal: E295	
Broj crteža: RC8	Naziv dijela: Nosач cilindra		



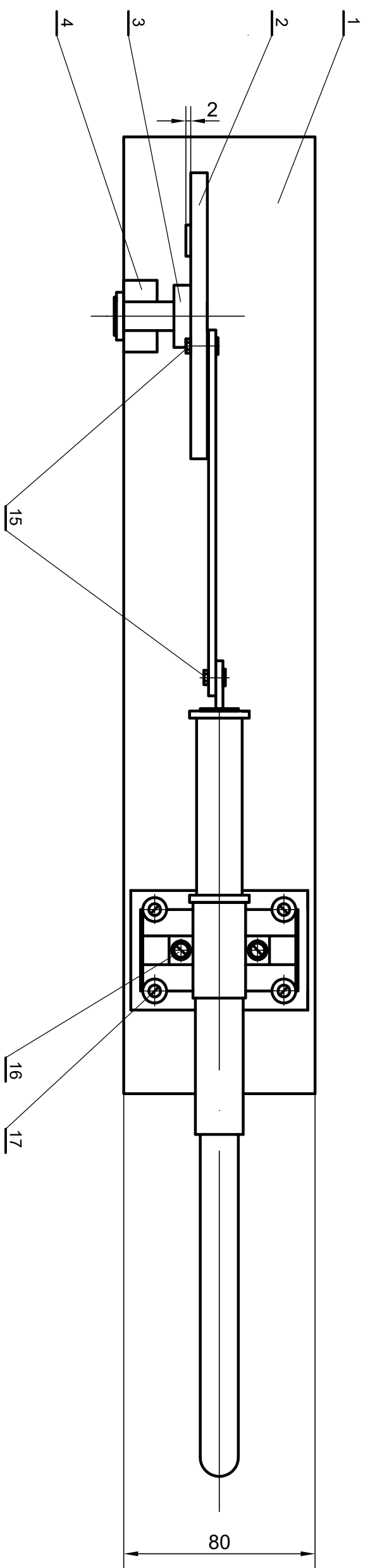
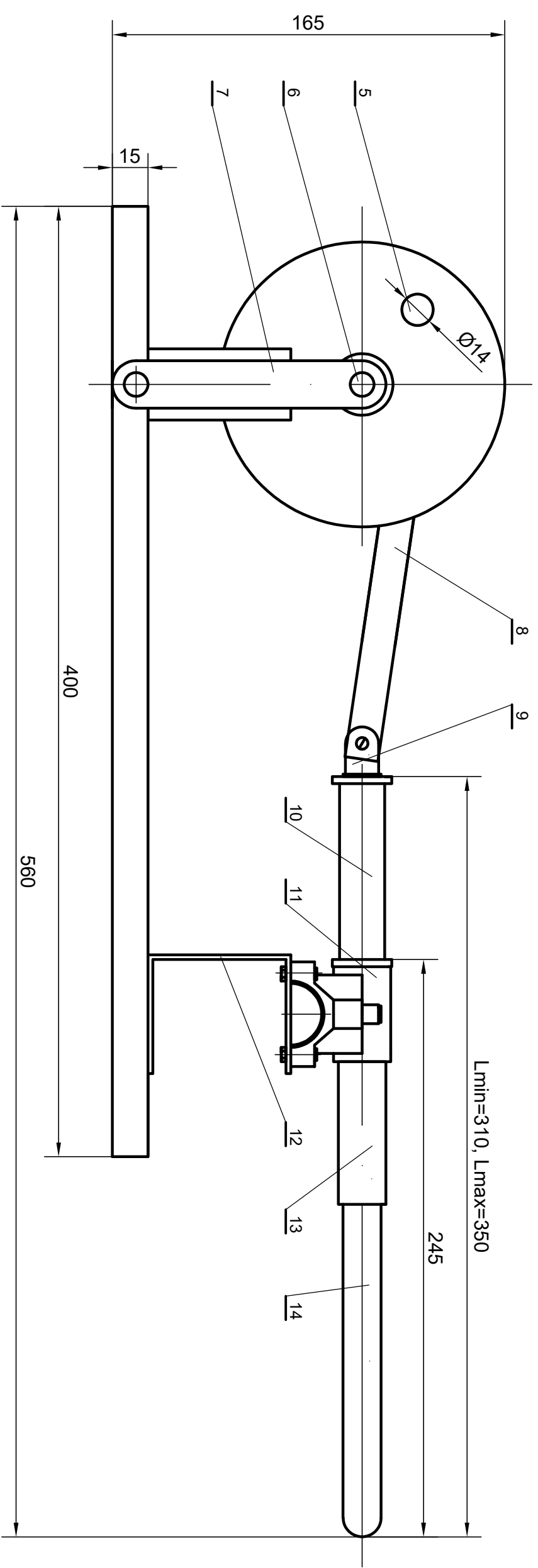
Mjerilo: 1:1	Datum: 10.10.2021.	Ime i prezime: Ivan Zorić	VELEUČILIŠTE U KARLOVCU Strojarski odjel
Pozicija: 7	Sklopni crtež (broj): SK1-1	Materijal: E295	
Broj crteža: RC2	Naziv dijela: Nosач radnog kola		




Mjerilo: 1:1	Datum: 10.10.2021.	Ime i prezime: Ivan Zorić	VELEUČILIŠTE U KARLOVCU Strojarski odjel
Pozicija: 2	Sklopni crtež (broj): SK1-1	Materijal: Plastika	
Broj crteža: RC1	Naziv dijela: Radno kolo		

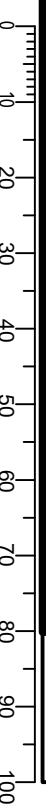


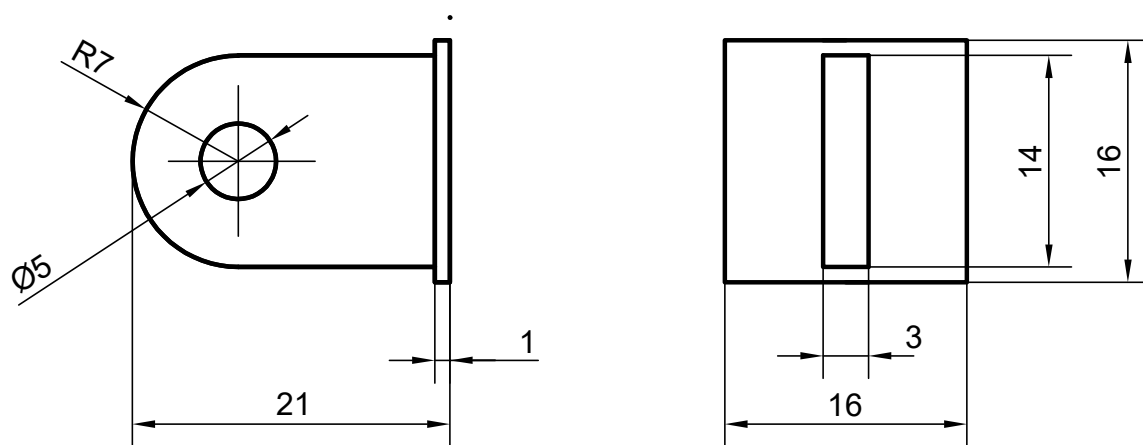
Mjerilo: 1:1	Datum: 10.10.2021.	Ime i prezime: Ivan Zorić	VELEUČILIŠTE U KARLOVCU Strojarski odjel
Pozicija: 14	Sklopni crtež (broj): SK1-1	Materijal: Staklo	
Broj crteža: RC7	Naziv dijela: Rezonantna cijev		



Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	 Veleučilište u Karlovcu
Razradio	10.10.2021.	Ivan Zorić		
Crtao	10.10.2021.	Ivan Zorić		
Pregledao				

Naziv:		Termoakustički motor	
Mjerilo originala		M 1:2	
Crtež broji:		SK1-1	
Format:		A3	
Listova:		1	
List:		1	





Mjerilo: 2:1	Datum: 10.10.2021.	Ime i prezime: Ivan Zorić	VELEUČILIŠTE U KARLOVCU Strojarski odjel
Pozicija: 9	Sklopni crtež (broj): SK1-1		Materijal: A653
Broj crteža: RC4		Naziv dijela: Spojnica	