

**VISOKA ŠOLA ZA VARSTVO OKOLJA**

**MAGISTRSKO DELO**

**IMPLEMENTACIJA STIRLINGOVEGA MOTORJA V  
KOGENERACIJSKI POSTROJ**

**BOŠTJAN KNEZ**

**VELENJE, 2020**

**VISOKA ŠOLA ZA VARSTVO OKOLJA**

MAGISTRSKO DELO

**IMPLEMENTACIJA STIRLINGOVEGA MOTORJA V  
KOGENERACIJSKI POSTROJ**

BOŠTJAN KNEZ

Varstvo okolja in ekotehnologije

Mentor: izr. prof. dr. Željko Vukelić

VELENJE, 2020

Številka: 727-5/2017-2

Datum: 12. 12. 2017

Na podlagi Diplomskega reda izdajam naslednji

#### SKLEP O MAGISTRSKEM DELU

Študent Visoke šole za varstvo okolja **Boštjan Knez** lahko izdela magistrsko delo z naslovom v slovenskem jeziku:

**Implementacija Stirlingovega motorja v kogeneracijski postroj.**

Naslov magistrskega dela v angleškem jeziku:

**Implementation of the Stirling engine in the cogeneration system.**

Mentor: **doc. dr. Željko Vukelič.**

Magistrsko delo mora biti izdelano v skladu z Diplomskim redom.

Pouk o pravnem sredstvu: zoper ta sklep je dovoljena pritožba na Senat VŠVO v roku 8 delovnih dni od prejema sklepa.

Izr. prof. dr. Boštjan Pokorny  
dekan



Visoka šola za varstvo okolja

Trg mladosti 7 | 3320 Velenje

t: 03 898 64 10 | f: 03 89864 13 | e: info@vsvo.si

[www.vsvo.si](http://www.vsvo.si)



## IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani Boštjan Knez, vpisna številka 34150074, študent podiplomskega študijskega programa Varstvo okolja in ekotehnologije, sem avtor magistrskega dela z naslovom

**Implementacija Stirlingovega motorja v kogeneracijski postroj.**


ki sem ga izdelal pod:

- mentorstvom izr. prof. dr. Željka Vukeliča

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- je predloženo delo moje avtorsko delo, torej rezultat mojega lastnega raziskovalnega dela;
- oddano delo ni bilo predloženo za pridobitev drugih strokovnih nazivov v Sloveniji ali tujini;
- so dela in mnenja drugih avtorjev, ki jih uporabljam v predloženem delu, navedena oz. citirana v skladu z navodili VŠVO;
- so vsa dela in mnenja drugih avtorjev navedena v seznamu virov, ki je sestavni element predloženega dela in je zapisan v skladu z navodili VŠVO;
- se zavedam, da je plagiatorstvo kaznivo dejanje;
- se zavedam posledic, ki jih dokazano plagiatorstvo lahko predstavlja za predloženo delo in moj status na VŠVO;
- je diplomsko delo jezikovno korektno in da je delo lektorirala prof. Polonca Glojek;
- dovoljujem objavo magistrskega dela v elektronski obliki na spletni strani VŠVO;
- sta tiskana in elektronska verzija oddanega dela identični.

Datum: 09. 04. 2020

Podpis avtorja: 

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentorju izr. prof. dr. Željku Vukeliću za pomoč pri izdelavi magistrskega dela.

Zahvala podjetniku Romanu Brodniku za izvedbo strojogradnih del in pomoč pri sestavi Stirlingovega motorja.

Posebna zahvala za sodelovanje tudi Valterju Patru, direktorju podjetja Valtis, d. o. o., ki je omogočil vgradnjo izdelanega Stirlingovega motorja v kurilno napravo.

## **IZVLEČEK**

Kogeneracija je energetski postroj v sestavi toplotnega stroja in električnega generatorja. Produkt postroja sta elektrika in toplota, ki v seštevku predstavljata visok energetski izkoristek. V prvem delu magistrske naloge je opravljen teoretični pregled kogeneracijskih sistemov in Stirlingovega motorja. S pomočjo strokovnjakov na področju energetike je opravljena analiza vzrokov za majhno uporabo Stirlingovih motorjev v kogeneracijskih sistemih. Predstavljene so možnosti za povečanje uporabnosti tega motorja v posameznih kogeneracijskih sistemih. Izdelava malega Stirlingovega motorja in vgradnja v kurilno napravo na biomaso je potrdila ugotovitev, da je Stirlingov motor primeren za uporabo v kogeneracijskih sistemih.

V drugem delu naloge je podrobneje predstavljen izdelan Stirlingov motor. Poleg opisanega testnega zagona so prikazane meritve osnovnih karakteristik izdelanega motorja. Izmerjeni podatki izkoristka motorja izkazujejo večja odstopanja od teoretičnih vrednosti. Ugotovljena odstopanja je mogoče pojasniti z večjimi izgubami energije v posameznih delih motorja, ki so tudi podrobneje analizirane.

Vgradnja izdelanega Stirlingovega motorja v kurilno napravo je nakazala določene smernice, ki bi jih bilo smiselno upoštevati pri vgradnji oziroma uporabi tega motorja v kogeneracijskih sistemih.

## **KLJUČNE BESEDE**

Kogeneracija, SPT-sistem, Stirlingov motor, kurilna naprava

## **ABSTRACT**

Co-generation is an energy plant composed of a heat engine and generator. The product of the plant is electricity and heat, which in total represent high energy efficiency. The first part of the master's thesis is a theoretical review of co-generation systems and Stirling engine. With the help of energy experts, an analysis of the causes for the low use of Stirling engines in co-generation systems was implemented. Possibilities for increasing the usefulness of this engine in individual co-generation systems are presented. The construction of a small Stirling engine and its installation in a biomass combustion plant confirmed the conclusion that the Stirling engine is suitable for use in co-generation systems.

The second part of the thesis presents in detail the manufactured Stirling engine. In addition to the described test run, measurements of the basic characteristics of the manufactured engine are shown. The measured engine efficiency data shows larger deviations from the theoretical values. The observed deviations can be explained by increased energy losses in individual engine parts, which are also analysed in more detail.

The installation of the manufactured Stirling engine in the combustion plant indicated certain guidelines that should be followed when installing or using this engine in co-generation systems.

## **KEY WORDS**

Co-generation, CHP system, Stirling engine, Combustion plant

## Kazalo vsebine

1	Uvod.....	1
1.1	Namen, cilji in hipoteze.....	2
1.2	Metode dela .....	2
2	Kogeneracija .....	3
2.1	Vpliv kogeneracije na trajnostno rabo energije .....	4
2.2	Spodbude postavitve SPTE-sistemov.....	4
2.3	Izkoristek SPTE-sistema .....	5
2.4	Velikost kogeneracijskih sistemov .....	6
2.5	Industrijska kogeneracija .....	6
2.6	Mikrokogeneracija .....	6
2.7	SPTE-sistemi z motorjem z notranjim zgorevanjem.....	7
2.8	SPTE-sistemi z uporabo gorivnih celic .....	7
2.9	SPTE s Stirlingovim motorjem .....	8
3	Stirlingov motor .....	8
3.1	Razvoj Stirlingovega motorja .....	9
3.2	Uporaba Stirlingovega motorja .....	11
3.3	Razvoj sodobnega Stirlingovega motorja.....	11
3.4	Sestava Stirlingovega motorja .....	13
3.5	Vrste Stirlingovih motorjev .....	14
3.5.1	Alfa Stirlingov motor .....	14
3.5.2	Beta Stirlingov motor .....	15
3.5.3	Gama Stirlingov motor.....	15
3.6	Regenerator toplote.....	16
3.7	Delovanje Stirlingovega motorja .....	16



3.7.1	Sprememba stanja 1→2 (slika 14).....	17
3.7.2	Sprememba stanja 2→3 (slika 15).....	17
3.7.3	Sprememba stanja 3→4 (slika 16).....	17
3.7.4	Sprememba stanja 4→1 (slika 17).....	18
3.8	Dejanski termodinamični Stirlingov krožni proces .....	20
3.9	Izkoristek Stirlingovega procesa .....	20
3.10	Uporaba Stirlingovega motorja v sodobnih SPTE-sistemih .....	21
3.11	Sestava in opis prenosov toplote v SPTE-sistemu s Stirlingovim motorjem .....	22
3.11.1	Kurilna ali zgorevalna naprava .....	22
3.11.2	Prenos toplotnega vira v Stirlingov motor .....	22
3.11.3	Hlajenje Stirlingovega motorja .....	23
3.11.4	Hlajenje dimnih plinov.....	23
3.12	Uporaba goriv v SPTE-sistemih s Stirlingovim motorjem .....	23
3.12.1	Uporaba plinskega goriva v SPTE-sistemu s Stirlingovim motorjem .....	25
3.12.2	Uporaba biomase v SPTE-sistemu s Stirlingovim motorjem .....	26
3.12.3	Uporaba sončnih žarkov v SPTE-sistemu s Stirlingovim motorjem .....	29
4	Implementacija Stirlingovega motorja v mikrosistem SPTE .....	31
4.1	Povzetek in grafična analiza strokovnih mnenj .....	31
4.1.1	Cena SPTE-sistema s Stirlingovim motorjem .....	32
4.1.2	Tehnične omejitve .....	33
4.1.3	Razvoj sistema .....	33
4.2	Izdelava Stirlingovega motorja.....	34
4.2.1	Ohišje motorja .....	36
4.2.2	Ročni mehanizem .....	36
4.2.3	Glavna gred z vztrajnikom .....	36
4.2.4	Ojnice.....	37

4.2.5	Batnice z batoma.....	37
4.2.6	Valja motorja .....	38
4.2.7	Povezovalni element .....	39
4.2.8	Končna oblika izdelanega Stirlingovega motorja.....	40
4.2.9	Test motorja in tehnični podatki .....	40
4.2.10	Realna moč in izkoristek motorja .....	42
4.2.11	Lociranje in opis izgub motorja .....	43
4.2.12	Stroški izdelave motorja .....	45
4.2.13	Vrednotenje cene motorja .....	46
5	Vgradnja motorja v kurilno napravo .....	46
5.1	Določitev kurilne naprave za namestitev Stirlingovega motorja .....	47
5.2	Določitev mesta namestitve Stirlingovega motorja.....	47
5.3	Vgradnja Stirlingovega motorja v kurilno napravo .....	48
5.4	Delovanje motorja po vgradnji .....	49
5.5	Rezultat vgradnje .....	49
6	Sklep .....	51
7	Povzetek .....	54
8	Abstract .....	55
9	Viri.....	56

## **KAZALO SLIK**

Slika 1: Diagram pretvorb energij v SPTE-sistemu .....	6
Slika 2: SPTE-motor s notranjim zgorevanjem (Borzen, d. o. o., 2019).....	7
Slika 3: SPTE gorilne celice (Golega, 2019) .....	8
Slika 4: Philipsov Stirling motor 4-235 iz leta 1958 (Dervis Erol, 2017) .....	10
Slika 5: Vozilo GM Calvair z vgrajenim Stirling motorjem.....	11
Slika 6: NASA Nihajni generator s Stirling ciklom (Nagaraja, 2019).....	12
Slika 7: Sistem blok Stirlingovih motorjev (Swedish Stirling AB, 2019).....	12
Slika 8: Stirlingov (alfa) motor (BHKW-Prinz, 2019).....	13
Slika 9: Sestava Stirlingovega motorja (Hot Air engens, 2019).....	14
Slika 10: Izvedba alfa Stirlingovega motorja (Qakir, 2012).....	15
Slika 11: Izvedba beta Stirlingovega motorja (Qakir, 2012).....	15
Slika 12: Izvedba gama Stirlingovega motorja (Qakir, 2012).....	16
Slika 13: Regenerator Stirlingovega motorja.....	16
Slika 14: Izotermna ekspanzija (Nakahara, 2019).....	17
Slika 15: Odvod toplote (Nakahara, 2019) .....	17
Slika 16: Kompresija (Nakahara, 2019) .....	18
Slika 17: Dovod toplote (Nakahara, 2019) .....	18
Slika 18: Delo cikla Stirling (Qakir, 2012).....	18
Slika 19: Realni potek Stirlingovega cikla (Qakir, 2012).....	20
Slika 20: SPTE s Stirlingovim motorjem (Thombare, 2008) .....	22
Slika 21: Primer hermetično zaprtega sistema Stirlingovega motorja (BHKW-Prinz, 2019) .....	23
Slika 22: Plinski gorilnik za Stirlingov motor (www.pci, 2019).....	25

Slika 23: Popolno in nepopolno zgorevanje .....	26
Slika 24: Polena kot vir toplote (Waltis, d. o. o., 2019) .....	27
Slika 25: Sekanci kot vir toplote (Waltis, d. o. o., 2019).....	28
Slika 26: Peleti kot vir toplote (BHKW-Prinz, 2019).....	28
Slika 27: Primer zbiranja sončnih žarkov (Solarstirlingplant, 2019).....	29
Slika 28: Mnenja sodelujočih strokovnjakov o bistvenih vprašanjih implementacije Stirlingovega motorja.....	32
Slika 29: Bistveni vplivi na ceno Stirlingovega motorja.....	33
Slika 30: Modelček motorčka Stirling .....	34
Slika 31: Ohišje motorja.....	36
Slika 32: Ročni mehanizem motorja .....	37
Slika 33: Ojnice .....	37
Slika 34: Batnice z batoma .....	38
Slika 35: Vroči valj .....	38
Slika 36: Hladni valj .....	39
Slika 37: Povezava med vročim in hladnim delom motorja .....	39
Slika 38: Končna odprta oblika motorja.....	40
Slika 39: P-V diagram izdelanega motorja .....	41
Slika 40: Teoretični izkoristek izdelanega motorja.....	42
Slika 41: Primerjava teoretičnih in realnih karakteristik izdelanega motorja.....	43
Slika 42: Točke izgub na motorju.....	44
Slika 43: Pritrditev motorja v kurilno napravo .....	47
Slika 44. Ponazoritev točke namestitve motorja v kurilno napravo.....	48
Slika 45: Shematski prikaz vgradnje motorja v kurilno napravo.....	48
Slika 46: Shematski prikaz seganja motorja v kurilno napravo.....	49
Slika 47: V kurilno napravo vgrajen motor .....	50

## **KAZALO TABEL**

Tabela 1: Zgodovina Stirlingovega motorja (Fakulteta za strojništvo ljubljana, 2010).....	9
Tabela 2: Primeri uporabe goriva oz. toplotnega vira pri različnih SPTR-sistemih (povzeto po Novak, 2012) .....	24
Tabela 3: Stroškovnik izdelave poskusnega motorja .....	45

## **KAZALO ENAČB**

$W = mR \ln V_2 V_1 (T_H - T_c)$ (Buden, 2014) (Enačba 1) .....	19
$\eta = T_H - T_{CTH}$ $\eta = 1 - T_{CTH}$ , (Enačba 2).....	20

## **1 Uvod**

Kogeneracija je energetski postroj, pri katerem uporaba določenega energenta omogoča proizvodnjo tako toplote kot električne energije. S kratico tak sistem opišemo kot SPTE-sistem. Kogeneracijski sistemi so v Sloveniji že uporabljeni v večstanovanjskih objektih, nakupovalnih središčih, hotelih, individualnih hišah ter poslovnih in industrijskih objektih. V Sloveniji so trenutno 304 takšni sistemi (Agencija za energijo, 2019). Osnovni SPTE-postroj je sestavljen iz toplotnega stroja, ki poganja elektrogenerator. Ključna značilnost SPTE-postroja je, da toploto, ki je odvedena od toplotnega stroja, koristno uporabimo za industrijske namene, ogrevanje prostorov ali ogrevanje sanitarne vode.

Popolna pretvorba energije goriva v električno energijo ni mogoča v nobenem energetskem sistemu. Poleg električne energije vedno nastaja tudi toplota, ki jo je v smislu visokega izkoristka nujno izkoristiti in ne zavreči. S termodinamičnega vidika je SPTE-postroj energetsko zelo učinkovit način izkoriščanja goriva. Energetska politika Slovenije je z implementacijo Energetskih uredb Evropske komisije v našo zakonodajo in s sprejetjem Energetskega zakona (EZ-1, Uradni list RS, št. 60/14) s posrednimi in neposrednimi spodbudami podprla investiranje v SPTE-sisteme.

V SPTE-sistemih, ki so trenutno v obratovanju, se kot toplotni stroj večinoma uporablja motor z notranjim zgorevanjem. Na tem mestu se poraja vprašanje, zakaj se načrtovalci sistemov v večini odločajo za motor z notranjim zgorevanjem. Predvsem v tujini so v fazi razvoja in testiranja različne SPTE-tehnologije, med njimi je tudi tehnologija z uporabo Stirlingovega motorja. To je motor, ki je sestavljen relativno enostavno in deluje na osnovi termodinamičnih zakonitosti širjenja in krčenja delovnega plina v motorju. Uporaba tega motorja v SPTE-sistemih je zelo skromna. V Sloveniji imamo trenutno le dva SPTE-sistema s Stirlingovim motorjem (Agencija za energijo, 2019).

Uporaba Stirlingovega motorja bi lahko glede na način delovanja v prihodnosti zasledovala cilje v smislu zmanjševanja porabe fosilnih goriv in zamenjave fosilnih goriv z obnovljivimi viri. To je eden od možnih načinov v smislu izpolnjevanja zelenih energetskih ciljev države in vplivanja na posledice podnebnih sprememb.

Pot do teh ciljev ni enostavna in samoumevna. Energetska politika države spodbuja investiranje v tehnologije z visokim izkoristkom in trajnostno naravnani način izrabe goriva. Preko finančnih spodbud se je trend investiranja že nakazal v pozitivno smer, kajti v zadnjem obdobju beležimo povečanje števila SPTE-sistemov. Število SPTE-sistemov v Sloveniji po uvedbi podpornega sistema spodbud v letu 2012 raste, vendar smo še vedno pod evropskim povprečjem.

Razvoj mikroenergetskih, malih in večjih energetskih sistemov bo šel v prihodnje v smer zmanjševanja porabe fosilnih goriv in povečanje rabe obnovljivih virov. S pomočjo strokovnjakov na področju energetike, ki sem jih povabil k sodelovanju pri pisanju te naloge, sem to mnenje tudi pridobil. Povabljeni strokovnjaki pokrivajo področja energetskega

svetovanja, strojegradnje in energetske ekonomije. Zanimalo me je strokovno mnenje glede vključitve in implementacije Stirlingovega motorja v SPTE-sisteme.

Stirlingov motor je bil patentiran leta 1816. Pri prebiranju strokovne literature je mogoče ugotoviti, da gre za učinkovit motor, ki bi lahko bil v posameznih malih in mikrosistemih SPTE uporabljen pogosteje. Zaradi iskanja odgovora na to vprašanje in hipotez, zastavljenih v tej nalogi, sem izdelal Stirlingov motor in ga vgradil v kurilno napravo.

## **1.1 Namen, cilji in hipoteze**

Namen magistrske naloge je s praktičnim eksperimentom izdelati in vgraditi Stirlingov motor v kurilno napravo. Želel sem podati smernico, na osnovi katere bi v prihodnosti lažje usmerjal lastno razmišljanje o razvoju na področju SPTE-sistemov z motorjem Stirling in k temu pritegniti potencialne proizvajalce teh sistemov.

V smislu izvedbe teoretičnega in praktičnega eksperimenta so cilji magistrske naloge naslednji:

- opraviti pregled literature in uporabe Stirlingovega motorja v SPTE v Sloveniji,
- določitev okoljskih in ekonomskih normativov uporabe Stirlingovega motorja v SPTE in
- implementacija Stirlingovega motorja v mikrosistem SPTE.

Vezano na omenjene zastavljene cilje so podane naslednje hipoteze:

### hipoteza št. 1

Stirlingov motor je energetsko zelo učinkovit in zato primeren za uporabo v kogeneracijskih (SPTE) sistemih.

### hipoteza št. 2

Izdelava Stirlingovega motorja je cenovno predraga in s tem predstavlja neracionalno uporabo tega motorja v kogeneracijskih (SPTE) sistemih.

### hipoteza št. 3

Stirlingov motor geometrijsko ne dopušča uporabe v kogeneracijskih sistemih.

## **1.2 Metode dela**

Magistrska naloga je sestavljena iz teoretičnega in empiričnega dela.

V teoretičnem delu je bila pregledana literatura na temo SPTE-sistemov in Stirlingovega motorja. Zajeta je bila literatura, dostopna preko spletnih knjižnic (cobiss in dLib.si),

literatura Mestne knjižnice Velenje, članki spletnega portala ScienceDirekt, spletne strani ministrstev, javnih agencij in podjetij, ki se ukvarjajo z razvojem in postavitvijo posameznih SPTE-sistemov.

V empiričnem delu sta bila v prvi fazi izvedena pregled in analiza mnenj strokovnjakov, ki sem jih uspel pritegniti k sodelovanju, v drugi fazi je bila izvedena izdelava Stirlingovega motorja in v tretji je sledila vgradnja izdelanega motorja v kurilno napravo. V drugi fazi sta potekali izdelava in sestava motorja v delavnici strojogradnje, tretja faza pa je bila izvedena v testnem laboratoriju podjetja Valtis, d. o. o., iz Maribora.

## 2 Kogeneracija

Kogeneracija je energetska postroj, ki za obratovanje uporablja določen energent, ob tem pa proizvaja tako električno energijo kot toploto. Sistem sestavlja tehnologija za pretvorbo energije goriva v mehansko energijo, generator električne energije in sistem za rekuperacijo toplote. S kratico tak sistem opišemo kot SPTE-sistem. SPTE-postroj primarno proizvaja električno energijo, odpadno toploto pa lahko koristimo za ogrevanje, pripravo sanitarne vode ali pa toploto uporabimo v industrijske namene.

Prednosti kogeneracijske enote:

- prodaja električne in toplotne energije,
- decentralizirana proizvodnja električne energije in toplote,
- nizki stroški obratovanja,
- večji energetski izkoristki,
- večja zanesljivost oskrbe z energijo,
- koriščenje energije neodvisno od javnega omrežja,
- veliki prihranki primarne energije,
- proizvodnja okolju prijazne energije,
- nižanje emisij toplogrednih plinov (CO<sub>2</sub>) ter emisij ostalih škodljivih plinov (CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>),
- uporaba ekoloških virov goriv oz. virov (zemeljski plin, utekočinjen naftni plin, kurilno ali rastlinsko olje, biodizel, biomasa, sonce) (Qakir, 2012).

SPTE-sistemi delujejo na zemeljski plin, bioplino, propan, dizelsko gorivo, biodizel ali lesno biomaso. Glede na izbiro energenta, ki ga uporablja sistem, se določi primerna tehnologija postroja. Poznamo postroje z uporabo motorja z notranjim zgorevanjem, turbine z notranjim zgorevanjem, parne turbine ter Stirlingov ali parni motor (Ekogrupa, 2019). SPTE-sistem lahko izboljša zanesljivost oskrbe z energijo in bi s postavitvijo mreže decentraliziranih SPTE-enot uporabnikom omogočili, da uporabijo energijo v neposredni bližini, kjer je nastala. S tem bi dosegli ekonomičnost energetskega sistema in posledično zmanjšali odvisnost od uvoza energentov, kar je ključni izziv slovenske in evropske energetske politike (Omega Air, 2019).



Področje cen električne energije in toplote, proizvedene v SPTE-sistemih, je država konkretizirala s sprejetjem Energetskega zakona (Uradni list RS, št. 27/07 in Uradni list RS, št. 60/19). Zakon je omogočil liberalizacijo energetskega trga, kar je podjetjem prineslo poslovne spodbude in finančne ugodnosti pri investiranju v proizvodnjo energije iz obnovljivih virov.

Energetski zakon zagotavlja 10-letne subvencije in zagotovljeno prodajo zelene elektrike, proizvedene v SPTE-sistemih po fiksni ceni. Subvencije za električno energijo, ki jih ureja Energetski zakon, so odvisne od vrste uporabljenih energentov in tehnologije posameznega SPTE-postroja (Agencija za energijo, 2019).

Visoka učinkovitost sistema predstavlja zmanjšanje stroškov za energijo in zmanjšanje emisij toplogrednih plinov. Z ukrepi, predvidenimi v Energetskem zakonu, se število SPTE-sistemov v Sloveniji povečuje, kar prispeva k doseganju željenih podnebnih ciljev. Ocenjen prihranek emisij toplogrednih plinov, dosežen z obratovanjem SPTE-naprav v letu 2015, je predstavljal 3,04 %. Skupno zmanjšanje emisij zaradi proizvodnje električne energije v SPTE-sistemih in s tem povezane proizvodnje toplote je leta 2014 znašalo 478,9 kt CO<sub>2</sub> ekv, leta 2015 512,4 kt CO<sub>2</sub> ekv, leta 2016 pa 535,5 kt CO<sub>2</sub> ekv (Agencija za energijo, 2016). Glede na spremljanje podatkov pa se je ta trend nadaljeval tudi v letih 2017 in 2018.

## **2.1 Vpliv kogeneracije na trajnostno rabo energije**

Z učinkovitim SPTE-sistemom dosežemo zmanjšanje porabe goriva in posledično ti sistemi proizvedejo manjšo količino toplogrednih plinov. Pri SPTE-postrojih se to zmanjšanje giblje v razponu od 10 % do 30 %.

Zmanjšana poraba goriva in visok izkoristek pa nista edini merili, da lahko sistem šteje kot trajnostno sprejemljiv. Poleg nizke porabe in izkoristka je nujno, da se postroju zagotovi kontinuiteta obratovanja glede na najugodnejši energent v določenem trenutku, ki je na razpolago. Tako na primer sistem, ki za delovanje uporablja zemeljski plin, v času, ko je na razpolago sončna energija, ne predstavlja visokega trajnostnega momenta. Nujno je, da SPTE-sistemi omogočajo možnost uporabe različnih energetskih virov. S tem lahko sistem ponudi maksimalni trajnostno naravnan učinek delovanja glede na uporabo obnovljivih in neobnovljivih goriv. (Qakir, 2012)

## **2.2 Spodbude postavitve SPTE-sistemov**

Energetska politika Slovenije je skladna z evropsko in vzpodbuja izgradnjo sistemov preko zagotovitve odkupa električne energije, spodbud cene odkupa električne energije in z neposrednimi subvencijami v investicije.

Spodbude za SPTE-sisteme so potrebne za vzdrževanje tržno-ekonomskih ravnovesij, ki nastopijo ob neravnovesju delovanja sistema glede na cene porabljenega goriva in prihodka od proizvedene električne energije. Pokrivajo del stroškov obratovanja postroja in morebitne dajatve, ki nastanejo na podlagi obračuna obremenjevanja okolja. Spodbude so namenjene

novim tehnologijam, ki stopajo na trg, in tehnologijam, ki so v zgodnji fazi komercializacije. Razvojne spodbude so višje in so opravičljive tudi v smislu razvoja energetske panoge (Agencija za energijo, 2016).

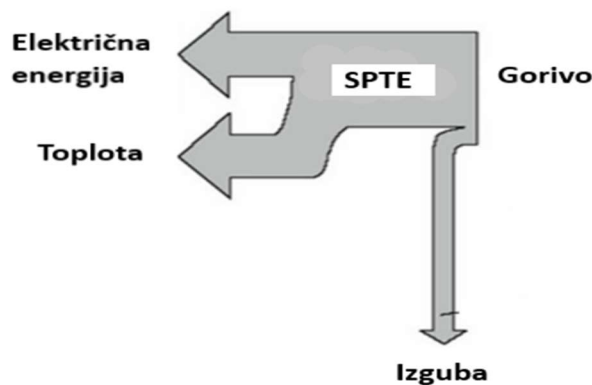
Za gradnjo posameznega SPTE-sistema mora investitor pridobiti vsa potrebna dovoljenja in soglasja. Sledi izgradnja proizvodne naprave in priključitev na električno omrežje ter začetek obratovanja. V zadnjem koraku sledi vključitev proizvodne naprave v podporno shemo in možnosti financiranja naložbe, kot jo predpisuje Energetski zakon (Agencija za energijo, 2019). Do spodbud je upravičen investitor, ki ima veljavno deklaracijo za proizvodnjo naprave. To je pogoj za prejemanje podpore za proizvedeno električno energijo. Podporno shemo postrojov z veljavno obratovalno deklaracijo poseduje in ažurira v skladu s Energetskim zakonom Agencija za energijo.

## **2.3 Izkoristek SPTE-sistema**

Slovenija nima specifičnih ciljev glede SPTE-sistemov in njihovega vpliva na okolje, zasleduje pa uredbe in cilje Evropske unije. Ti sistemi dajejo pomemben prispevek k doseganju nacionalnih ciljev na področju učinkovite rabe energije. Skladno z direktivo 2012/27/EU si je Slovenija zastavila cilj izboljšati energetska učinkovitost do leta 2020 (Agencija za energijo, 2016). Energetska učinkovitost je med stroškovno najučinkovitejšimi ukrepi za doseganje ciljev zmanjševanja emisij toplogrednih plinov in doseganja 25 % ciljnega deleža obnovljivih virov energije v bilanci rabe bruto končne energije do leta 2020 (Ministrstvo za infrastrukturo, 2019).

Konvencionalno pridobivanje električne energije v termoelektrarnah poteka ob povprečno 36 % izkoristku primarnega goriva. Ob upoštevanih izgubah pri prenosu in distribuciji električne energije, ki znašajo najmanj okrog 5 %, se ta vrednost zmanjša na 34 %. V termoelektrarnah je približno 66 % toplote nepovratno izgubljene (Agencija za energijo, 2016).

Posamični SPTE-sistemi so dimenzionirani glede na potrebe uporabnika. Proizvedena električna energija se v večini primerov proda v elektroomežje na podlagi »Uredbe o podporah elektriki, proizvedeni iz obnovljivih virov energije in v soproizvodnji toplote in elektrike z visokim izkoristkom« (Uradni list RS, št. 74/16). Proizvedena toplota se uporablja za ogrevanje in na ta način izkoristek sistema preseže 80 % (Borzen, d. o. o., 2019)



Slika 1: Diagram pretvorb energij v SPTE-sistemu

## 2.4 Velikost kogeneracijskih sistemov

SPTE-sisteme dimenzioniramo glede na potrebno količino toplote, ki jo potrebujemo na določeni lokaciji postavitve sistema. Glede na posamični podatek porabe toplote in izkoristek toplote se dodeli velikost posamične instalirane električne naprave. Glede na velikost SPTE-sistemov ločimo:

- industrijsko kogeneracijo, ki vsebuje napravo z nazivno električno močjo nad 1 MW
- malo kogeneracijo, ki vsebuje napravo z nazivno električno močjo do 1 MW
- mikrokogeneracijo, ki vsebuje napravo z nazivno električno močjo do 50 kW

## 2.5 Industrijska kogeneracija

Industrijska kogeneracija je sistem, ki v postroju kot pogonski agregat v večini primerov uporablja sistem s parnimi turbinami, plinskimi turbinami ali motorje z notranjim zgorevanjem. Govorimo o SPTE-sistemih, katerih nazivna električna moč znaša od 1 do 500 MW. V industriji se uporabljajo tudi sistemi manjše moči, ki jih štejemo pod male kogeneracijske sisteme. Proizvedeno električno energijo in toploto uporabljajo za potrebe industrijskih obratov, morebitne viške pa prodajajo. Industrijsko kogeneracijo najdemo v različnih panogah, predvsem v kovinski industriji in komunalni dejavnosti (ogrevanje naselij). V Sloveniji imamo trenutno 11 industrijskih in 91 malih kogeneracij. Industrijski postroji se nahajajo na Jesenicah, Ravnah, v Kidričevem, Trbovljah, Ljubljani, Mariboru in Kranju (Agencija za energijo, 2019).

## 2.6 Mikrokogeneracija

Mikrokogeneracijski postroj je postroj z do 50 kW instalirane električne moči. Sistem je dimenzioniran, da zadosti pokrivanju toplotnih potreb večjih ali manjših posamičnih objektov. Mikrokogeneracijski postroj je primeren za večstanovanjske stavbe, zdravstvene domove, poslovne objekte, trgovske centre, domove starejših, športne objekte, gostinske in turistične objekte, vzgojno-izobraževalne ustanove itd.

Mikropostroj SPTE mora zadostiti naslednjim pričakovanjem (Kuhn, Jiří, & Bulatov, 2008)

- dosegati mora visok skupni izkoristek goriva,
- predstavlja naj poceni vzdrževanje sistema,
- pri delovanju povzroča nizko raven hrupa in vibracij ter
- zagotoviti mora nizke emisije izpustov.

Iz registra deklaracij o proizvodnih napravah je razvidno, da je v Sloveniji trenutno 253 mikropostrojenj SPTE (Agencija za energijo, 2019).

Najpogostejši SPTE-mikrosistemi so sistemi z motorji z notranjim zgorevanjem, se pa glede na razvojne trende pričakuje vključitev gorivnih celic in motorja Stirling.

## **2.7 SPTE-sistemi z motorjem z notranjim zgorevanjem**

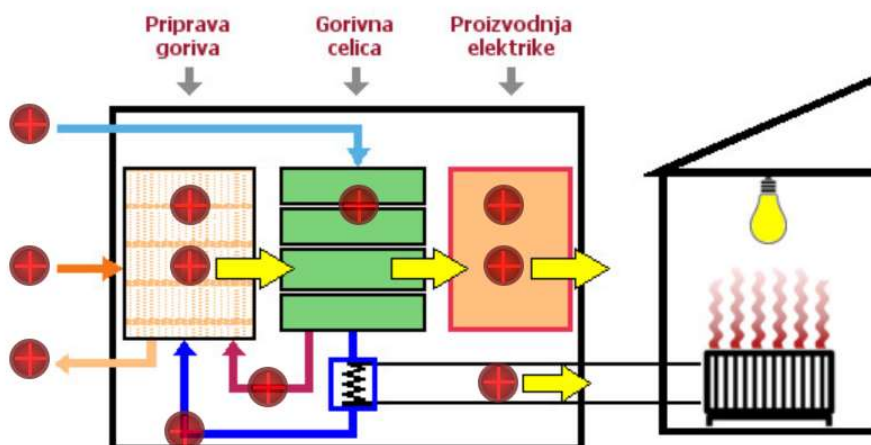
V sistemu soproizvodnje toplotne in električne energije se trenutno najpogosteje uporablja motor z notranjim zgorevanjem. Gre za uporabo fosilnih goriv, iz okoljskih in ekonomskih vidikov pa je zelo smotrna uporaba zemeljskega plina. Obdelava goriva s postopkom fermentacije in pirolize omogoča motorjem z notranjim zgorevanjem tudi uporabo bioplina ali lesnega plina. Proizvedena električna energija se v večini primerov proda v elektrodistribucijsko omrežje. Toplotna energija se v obliki tople vode v temperaturnem območju od 90 °C do 110 °C (delovna temperatura motorja in hlajenje izpušnega sistema (Rihard, 2014)) preko razdelilnega sistema distribuira do uporabnikov. Slaba stran sistema SPTE z motorjem z notranjim izgorevanjem je hrup, ki se ga omili z zvočnoizolacijskimi rešitvami.



Slika 2: SPTE-motor s notranjim zgorevanjem (Borzen, d. o. o., 2019)

## **2.8 SPTE-sistemi z uporabo gorivnih celic**

Gorivne celice uporabljamo za neposredno proizvodnjo električne energije z vodikom. Pri običajni elektrolizi s pomočjo vložene električne energije pridobivamo vodik in kisik, v gorivni celici pa poteka obratna kemična reakcija. Tako pridobljeno toploto se uporabi za ogrevanje stanovanjskega objekta. Sistema za oskrbo z vodikom v Sloveniji še ni oziroma je slabo razvit, zato kogeneracijski sistemi z gorivnimi celicami uporabljajo kot gorivo zemeljski plin, ki se ga pred neposredno uporabo pretvori v vodik. (Golega, 2019)



Slika 3: SPTE gorilne celice (Golega, 2019)

## 2.9 SPTE s Stirlingovim motorjem

SPTE-sistemi s Stirlingovim motorjem uporabljajo motor, katerega sestavni deli, opis in delovanje so predstavljeni v nadaljevanju.

Prednosti postroja s Stirlingovim motorjem dajejo smernice razvoja in uporabe posamičnih SPTE-sistemov v prihodnosti. Med glavne prednosti sistema štejemo možnost uporabe različnih goriv, ekonomičnost glede na pripravo uporabe goriva, vzdrževanje sistema in zagotavljanje kakovosti zgorevanja goriva. To posledično pripomore k nižji emisiji izpustov in predstavlja zanesljivost delovanja motorja. V Sloveniji imamo trenutno dva SPTE-sistema s Stirlingovim motorjem. En sistem uporablja kot gorivo zemeljski plin, instalirana električna moč sistema znaša 3,2 kW, drug sistem z električno močjo 9 kW pa deluje na lesno biomaso (Agencija za energijo, 2019).

Testiranja SPTE-sistemov s Stirlingovim motorjem in študije, ki se ukvarjajo s testiranjem teh sistemov, so pokazale naslednje ugotovitve ali pomanjkljivosti (Kuhn, Jiří, & Bulatov, 2008):

- omejitve pri umestitvi motorja v sistem,
- pomanjkanje množične proizvodnje motorjev, ki bi jih uporabili v sistemu,
- zelo visoki investicijski stroški.

## 3 Stirlingov motor

Stirlingov motor je toplotni stroj, ki pretvarja dovedeno toplotno energijo v mehansko delo. Deluje na principu kompresije in ekspanzije delovnega plina v notranjosti motorja. Toplota za odvijanje delovnih procesov v motorju je dovedena v motor preko prenosnikov toplote.

To praktično pomeni, da se zgorevanje izvede izven motorja in zato ta motor imenujemo tudi motor z zunanjim zgorevanjem.

Od patentiranja leta 1816 ni doživel množične uporabnosti, kljub temu da je konstrukcijsko v primerjavi z motorjem z notranjim zgorevanjem bistveno enostavnejši. Za delovanje ne uporablja vžigalnih svečk, vbrizgalnih šob, ventilov, naprav za dovod goriva ali zraka in je sestavljen iz bistveno manj gibljivih ter vrtečih se elementov (Rihard, 2014). Praktično to predstavlja ekonomičnost vzdrževanja in zanesljivost delovanja motorja.

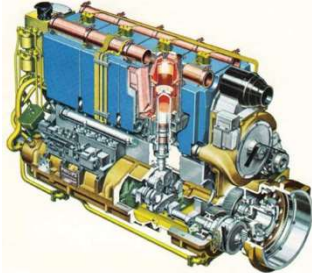
### 3.1 Razvoj Stirlingovega motorja

Izumitelj motorja Stirling je Robert Stirling. Izum je patentiral leta 1816. To je obdobje, ko se je v industriji v večini uporabljal parni stroj. Parni motorji so bili hrupni, veliko so se kvarili (prihajalo je do eksplozij parnih strojev) in so bili zelo potratni. Stirlingov cilj je bil razviti motor, ki bi bil alternativa parnemu stroju z boljšimi karakteristikami (Hot Air engens, 2019).

Zgodovinski pregled in uporaba Stirlingovega motorja do danes sta predstavljena v naslednji tabeli:

Tabela 1: Zgodovina Stirlingovega motorja (*Fakulteta za strojništvo ljubljana, 2010*)

Leto	Razvoj in uporaba Stirlingovega motorja
1816	Robert Stirling izumi tip motorja, ki deluje na principu gretja, ekspanzije in ohlajanja plina, ki se nahaja v cilindru. Motor deluje na principu zunanjega zgorevanja goriva.
1817	Delovati začne prvi motor, ki deluje po Stirlingovem principu, z nazivno močjo 1,5 kW, ki ga uspešno uporabljajo za črpanje vode v kamnolomih.
1827	Robert in njegov mlajši brat James Stirling izboljšata motor, tako da deluje pri višjem tlaku, kot je atmosferski.
1845	James Stirling izdelava izboljšan motor, pri katerem uporabi regeneratore toplote, vodno hlajenje ter boljša usnjena tesnila, ki omogočijo višji delovni tlak motorja. Moč motorja znaša 33 kW. Motor več kot tri leta poganja delovne stroje v livarni Doundy Company.
1860	Različne izvedbe bolj in manj uspešno delujočih Stirlingovih motorjev se pojavijo tudi v Franciji, Nemčiji in Angliji.

1862	Alexander Kirk predstavi hladilno napravo, ki deluje na principu Stirlingovega procesa. Služi za proizvodnjo parafinskega voska v tovarni na Škotskem. Naprava neprekinjeno deluje skoraj deset let.
1937	Prične se drugo obdobje uporabe Stirlingovih motorjev, ki jih podjetje Philips uporablja za pogon generatorjev v svojih električnih izdelkih.
1938	V Philipsu izdelajo prvi toplozračni Stirlingov motor, ki razvije moč 16 W pri 1000 obratih v minuti.
1943	V Philipsu razvijejo Stirlingov motor, ki doseže moč 6 kW pri 3000 obratih v minuti.
1946	Ameriška vojska podpiše s podjetjem Philips pogodbo za razvoj generatorjev električne energije, ki bi jih poganjali Stirlingovi motorji.
1958-1970	Sodelovanje pri razvoju Stirlingovega motorja med podjetjema Philips in General Motors. Štiricilindrski motor razvije moč 265 kW pri 150 obratih v minuti. Kot toplotni vir se je uporabilo fosilno gorivo (Dervis Erol, 2017) 
	<i>Slika 4: Philipsov Stirling motor 4-235 iz leta 1958 (Dervis Erol, 2017)</i>
1972	Razvoj štiricilindrskega avtobusnega motorja.
1975	V Fordovem testnem avtomobilu uporabijo Stirlingov motor z močjo 127 kW.
1978	Pri Fordu zaključijo in opustijo projekte s Stirlingovim motorjem.
1998	Švedska mornarica ima tri tipe podmornic (Gotland, Uppland in Holland), ki uporabljajo Stirlingov motor.
1998	Ameriški avtomobilski gigant General Motors razvija in prične s testiranjem Stirlingove pogonske enote, ki bi jo lahko uporabili za pogon avtomobilov. Enocilindrični Stirlingov motor je bil vgrajen v vozilo General Motors tipa Calvair. (Daily, 2020)



*Slika 5: Vozilo GM Calvair z vgrajenim Stirling motorjem*

### **3.2 Uporaba Stirlingovega motorja**

Pri Stirlingovem motorju gre za dovod toplote od zunaj v notranjost valjev motorja. To motorju omogoča, da ga lahko uporabimo v različnih panogah, le da imamo zagotovljen ustrezen toplotni vir. Za delovanje lahko uporablja različne vire toplote, ki lahko vroči valj (vroči del) motorja segrevajo direktno ali indirektno. Kot vir toplote lahko uporabimo fosilna goriva, jedrska goriva, biomaso, geotermalno energijo ali energijo sonca. Ker Stirlingov motor za delovanje ne potrebuje nujno kisika, je primeren in uporaben tudi v vesoljski tehnologiji. Pregled širokopaletne uporabe Stirlingovega motorja je razviden iz tabele 1.

### **3.3 Razvoj sodobnega Stirlingovega motorja**

Današnja okoljska situacija intenzivno spodbuja razmišljanje o resnejši implementaciji in uporabi Stirlingovega motorja v različne panoge (industrija, komunala, promet). Zaradi večjega vključevanja uporabe obnovljivih virov v energetske sisteme bi lahko Stirlingov motor v prihodnosti postal ena od možnosti za zmanjševanje negativnih vplivov uporabe goriv na okolje.

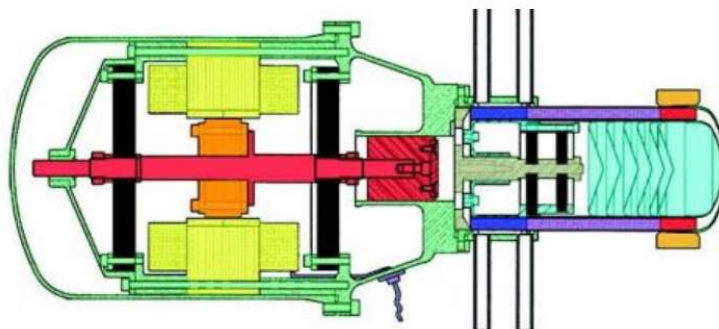
Konkretnejši sodobnejši razvoj Stirlingovih motorjev se je začel po letu 1990. Predvsem so se razvoja lotila nekatera podjetja v Združenih državah Amerike in v Evropi.

Raziskovalni center NASE Glenn Research (ZDA) je razvil visoko učinkovit Stirlingov motor, ki toploto pretvarja v električno energijo z linearnim nihanjem alternatorja (slika 4). Kot gorivo se pri tej izvedbi motorja lahko uporablja tudi jedrsko energijo, kar razširi področje uporabnosti motorja v vesoljsko tehnologijo in na področje podmornic.

Delovanje motorja je zanimivo z vidika, da ne uporablja klasičnega ročičnega mehanizma za pretvorbo toplote v krožno gibanje, pač pa gre za direktno pretvorbo toplote v električno energijo z nihanjem linearnega alternatorja. Nihanje tega alternatorja se izvede s pomočjo raztezanja in krčenja plina po zakonitostih Stirlingovega krožnega procesa, premikanje batov je izvedeno s pomočjo vzmetne tehnike.



Prednost omenjenega motorja je, da pri obratovanju ne potrebuje mazalnega sistema, konstrukcija motorja pa zahteva poleg temperaturno odpornih materialov še izredno kakovostno vzmetno konstrukcijo krmiljenja batov. Motor ni doživel masovne proizvodnje. Bil je testiran in uporabljen v vesoljski tehnologiji, v zadnjem času pa se mu obeta večja uporabnost v solarni tehniki (Nagaraja, 2019).



Slika 6: NASA Nihajni generator s Stirling ciklom (Nagaraja, 2019)

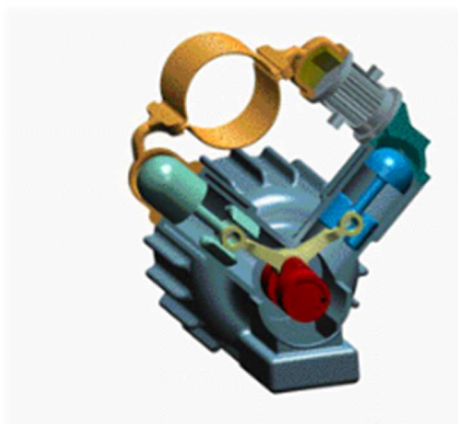
V Evropi po javno dostopnih spletnih podatkih v razvoj Stirlingovega motorja največ vlagata Švedska in Nemčija, v svetovnem merilu ZDA, v zadnjem obdobju pa večje premike v razvoju na tem področju kaže tudi Kitajska. V teh državah najdemo kar nekaj podjetji, ki proizvajajo Stirlingove motorje.

Na Švedskem je podjetje Sweden Stirling AB razvilo koncept oziroma sistem postavitve motorjev v tako imenovano blok izvedbo. Gre za princip postavitve motorjev, kjer lahko sistemu poljubno večamo ali manjšamo moč. Ti bloki temeljijo na izrabi različnih vrst goriv. Sisteme, ki jih proizvaja omenjeno podjetje in za dovod toplote uporabljajo sončne žarke, testirajo na Siciliji in v Španiji.



Slika 7: Sistem blok Stirlingovih motorjev (Swedish Stirling AB, 2019)

Nemška podjetja (Microgen Engine Systems (MEC) in Viessmann) proizvajajo motorje, ki jih v praksi uporabljamo v mikro SPTE. Kot gorivo ti motorji v večini primerov uporabljajo biomaso ali zemeljski plin.



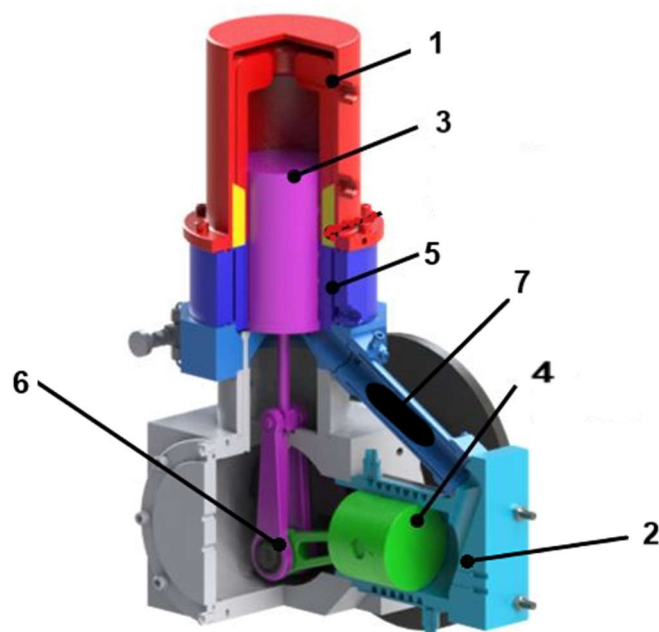
Slika 8: Stirlingov (alfa) motor (BHKW-Prinz, 2019)

S posameznim razvojem Stirlingovega motorja so se ukvarjala tudi nekatera podjetja iz drugih predelov sveta, vendar večjega uspeha v smislu obsežnejše proizvodnje motorjev niso doživela. Podobno je tudi v Sloveniji, kjer se s področjem ukvarja peščica posameznikov, ki pa konkretnjšega rezultata še niso uspeli prikazati.

### **3.4 Sestava Stirlingovega motorja**

Stirlingov motor je motor z zunanjim zgorevanjem. Motor poganja toplota, dovedena v motor oziroma v delovni medij motorja. Delovni medij prehaja od vročega dela v hladni del motorja. Pri prehajanju iz vročega dela v hladni del se na osnovi temperaturnih razlik ustvarja širjenje in krčenje delovnega medija (plina), ki povzroča uporabne tlake za pogon in delovanje motorja. Osnovni sestavni deli Stirlingovega motorja so:

1. vroči val in prenosnik toplote v motor
2. hladilni ali hladni val
3. vroči ali krmilni bat
4. delovni bat
5. hladilni sistem
6. glavna gred z vztrajnikom
7. regeneratorski sistem toplote



Slika 9: Sestava Stirlingovega motorja (*Hot Air engens, 2019*)

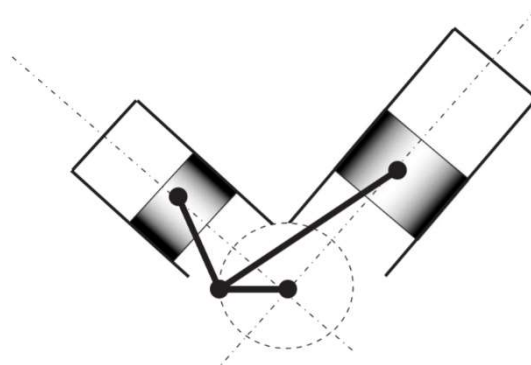
### 3.5 Vrste Stirlingovih motorjev

Obstajajo tri glavne vrste oziroma izvedbe Stirlingovih motorjev, ki se razlikujejo v postavitvi valjev, izvedbi ročičnega mehanizma in načinu premikanja delovnega medija med vročim in hladnim valjem. To so izvedbe alfa, beta in gama.

#### 3.5.1 Alfa Stirlingov motor

Ta izvedba ima dva valja z batoma, kjer sta vroči in hladni valj ločena. Kotni zamik obeh valjev znaša okoli  $90^\circ$ , pozicija ojničnih sornikov na glavni gredi oziroma vztrajniku je v večini primerov v enotni liniji (slika 10).

Slabost te izvedbe je zagotavljanje tesnjenja bata v vročem valju. To lahko delno rešimo s konstrukcijo valja in bata na način, da je tesnjenje odmaknjeno od maksimalnega temperaturnega območja valja. S konstrukcijo ojnice na glavni gredi oziroma vztrajniku pa dosežemo ustrezne navore motorja.

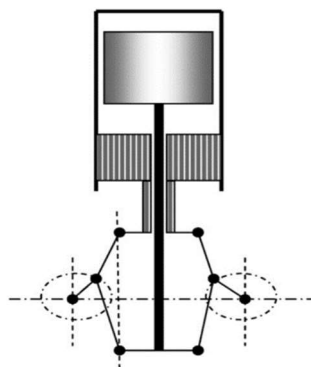


Slika 10: Izvedba alfa Stirlingovega motorja (Qakir, 2012)

### 3.5.2 Beta Stirlingov motor

Gre za izvedbo, kjer je en sam valj izpostavljen vročemu in hladnemu delu motorja. V hladnem delu valja je delovni bat, skozi katerega poteka ojnica za krmiljenje delovnega krmilnega bata. Krmilni bat ni v neposrednem stiku s površino valja, pač pa samo prekrvari delovni medij iz enega v drugi del valja.

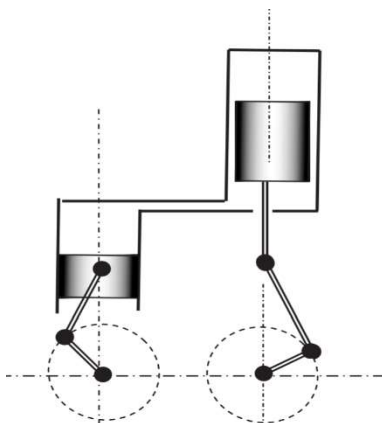
Kompresijsko razmerje definira samo delovni valj, ki mora ob tem zagotavljati tesnjenja med valjem in batom ter ojnico krmilnega bata. Ojnici na glavni gredi oziroma vztrajniku sta zamaknjeni za potrebno razmerje  $90^\circ$ .



Slika 11: Izvedba beta Stirlingovega motorja (Qakir, 2012)

### 3.5.3 Gama Stirlingov motor

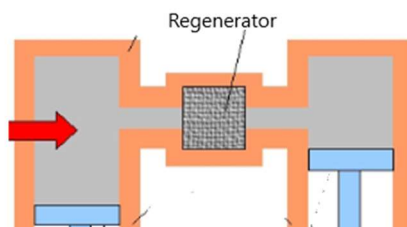
Izvedba gama Stirlingovega motorja je zelo podobno izvedbi beta. Razlika je v tem, da vroči in hladni del valja ločimo z dvema posameznima valjema, ostale lastnosti motorja pa so enake kot pri izvedbi beta. Delovni medij med valjema prehaja skozi vmesni prostor, kar povzroči zmanjšanje kompresijskega razmerja.



Slika 12: Izvedba gama Stirlingovega motorja (Qakir, 2012)

### 3.6 Regenerator toplote

Regenerator je del motorja, ki se uporablja pri vseh treh izvedbah, da pri prehodu delovnega medija iz vročega valja prevzame del toplote. Pri vračanju delovnega medija v vroči val, pa mu del toplote spet odda oziroma povrne. Nekako gre za reverzibilnost toplote delovnega medija pri prehajanju znotraj motorja. Na ta način se izboljša izkoristek Stirlingovega motorja. Kot regenerator se lahko uporabi kovinska volna ali drug ustrezen material, ki pri prihodu delovnega medija ne predstavlja pretiranega upora.



Slika 13: Regenerator Stirlingovega motorja

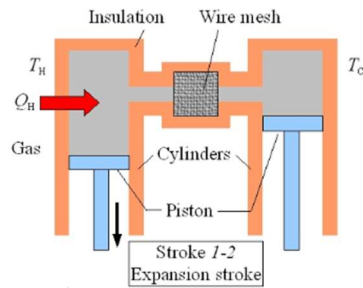
### 3.7 Delovanje Stirlingovega motorja

Delovanje Stirlingovega motorja najlažje popišemo v štirih korakih ali taktih. Na naslednjih slikah (od 14 do 17) so prikazani posamezni takti delovanja Stirlingovega motorja. Shematsko je prikazana alfa različica motorja, kjer levi valj predstavlja vroči valj, desni pa hladni valj. Indeks H in C pri temperaturi oz. toploti označujeta »hladni« in »vroči« del naprave.

Takti si sledijo zaporedno, delovanje posameznih taktov je reverzibilno. Vris posameznih taktov in točk v  $P$ - $V$ -diagram (slika 18) predstavlja delovanje idealnega Stirlingovega krožnega procesa (Nakahara, 2019).

### 3.7.1 Sprememba stanja 1→2 (slika 14)

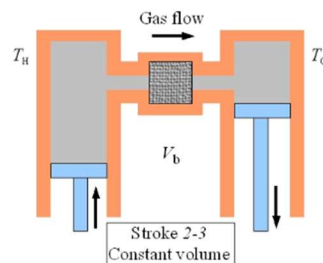
Delovni medij v motorju se širi pri konstantni temperaturi. Levi bat se pomakne navzdol in desni bat je fiksiran (zaradi zamika batov). Delovni medij absorbira toploto  $Q_H$ . (Izotermna ekspanzija, linija 1→2 na sliki 18) (Nakahara, 2019).



Slika 14: Izotermna ekspanzija (Nakahara, 2019)

### 3.7.2 Sprememba stanja 2→3 (slika 15)

Pri konstantni prostornini  $V_2$  se temperatura plina zmanjša od temperature vročega valja  $T_H$  do temperature hladnega valja  $T_C$ . Levi bat potuje navzgor, desni pa navzdol, tako da ostane celotna prostornina konstantna. Delovni medij potuje iz vročega valja v desni hladni valj, pri tem pa del toplote  $Q$  odda regeneratorju (odvajanje toplote, linija 2→3 na sliki 18) (Nakahara, 2019).

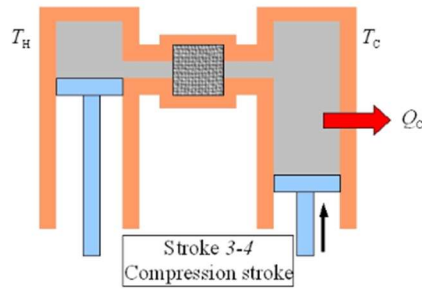


Slika 15: Odvod toplote (Nakahara, 2019)

### 3.7.3 Sprememba stanja 3→4 (slika 16)

Delovni medij se komprimira (bat v hladnem valju potuje navzgor) pri konstantni temperaturi  $T_C$ . Energija, potrebna za komprimiranje, je nakopičena v vztrajniku pri ekspanzijskem taktu.

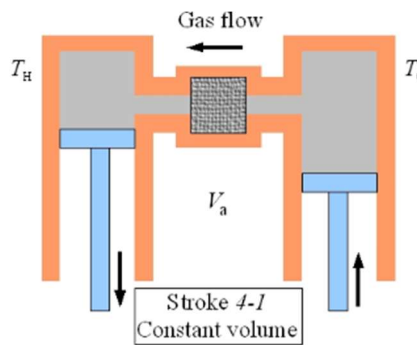
Poteka odvod toplote  $Q_C$  (izotermalna kompresija, linija 3→4 na sliki 18) (Nakahara, 2019).



Slika 16: Kompresija (Nakahara, 2019)

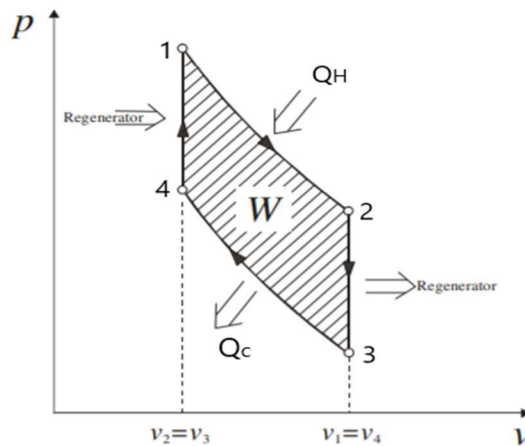
### 3.7.4 Sprememba stanja 4→1 (slika 17)

Pri konstantni prostornini  $V_1$  se temperatura delovnega medija veča od  $T_C$  do  $T_H$ . Levi bat potuje navzdol, desni pa navzgor. Prostornina je konstantna. Delovni medij potuje iz hladnega valja v vročega, pri tem pa nazaj prevzema del toplote od regeneratorja, ki jo je oddal v koraku 2→3 (ogrevanje delovnega medija, linija 4→1 na sliki 18). (Nakahara, 2019)



Slika 17: Dovod toplote (Nakahara, 2019)

Površina znotraj točk 1, 2, 3 in 4  $P$ - $V$ -diagrama (slika 18) predstavlja pridobljeno ali koristno delo ( $W$ ) idealnega Stirlingovega krožnega procesa.



Slika 18: Delo cikla Stirling (Qakir, 2012)

Pridobljeno delo je odvisno izključno od količine dovedene toplote v vroči valj motorja (M. Mori, 2010).

Končna enačba koristnega dela ( $W$ ) se glasi:

$$W = mR \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) (T_H - T_C) \text{ (Buden, 2014) (Enačba 1)}$$

Pomen izrazov:

$W$  – pridobljeno delo (J)

$m$  – masa delovnega medija (kg)

$V$  – prostornina ( $\text{m}^3$ )

$T$  – temperatura (K)

$R$  – specifična plinska konstanta (J/kgK)

Iz zgornje enačbe Stirlingovega procesa vidimo, da lahko delo povečamo s povečanjem temperaturne razlike med  $T_H$  in  $T_C$ , s povečanjem kompresijskega razmerja ali z uporabo plina, ki ima večjo specifično plinsko konstanto  $R$ . Stirlingov motor ima v realnem obratovanju omejitve pri kompresiji in temperaturi, kar posledično pomeni, da je uporaba plina z večjo plinsko konstanto ideja za več pridobljene moči motorja. Zaradi velike specifične konstante bi se v Stirlingovih motorjih lahko uporabljala vodik ( $R = 4122 \text{ J/kgK}$ ) in helij ( $R = 2078 \text{ J/kgK}$ ). Za primerjavo znaša plinska konstanta zraka  $287 \text{ J/kgK}$  (Buden, 2014).

V študiji *Parametrična analiza Stirlingove soproizvodne enote na biomaso za uporabo v hišni tehniki* (Uroš, Zupan, & Butala, 2017) je prikazan plin helij kot najučinkovitejši delovni medij v Stirlingovem motorju.

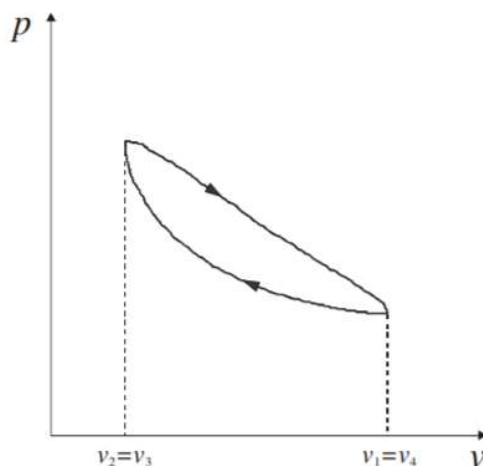
V eksperimentalnem delu so pričakovali, da bo dal sistem najboljše rezultate v primeru uporabe plina z najvišjo plinsko konstanto (vodik). Z upoštevanjem delovnih razmer v motorju in stanja specifične toplote plina pri stalnem tlaku in specifične toplote plina pri nespremenjeni prostornini pa so rezultati spet pokazali najboljši izkoristek motorja takrat, ko motor kot delovni medij uporablja helij.

Izhajajoč iz tega članka lahko ugotovimo, da v motorju za doseganje izboljšanja izkoristka ni dovolj samo zamenjati delovnega medija v motorju, pač pa je potrebno motor konstrukcijsko prilagoditi posameznemu uporabljenemu delovnemu mediju.



### 3.8 Dejanski termodinamični Stirlingov krožni proces

Dejanski proces v Stirlingovem motorju se bistveno razlikuje od teoretičnega Stirlingovega termodinamičnega procesa, kar je razvidno s slike 19.



Slika 19: Realni potek Stirlingovega cikla (Qakir, 2012)

V dejanskem procesu ni mogoče doseči popolne izohore (izohorni dovod in odvod toplote), ker se delovni bat med ciklom ne ustavi v času dovoda in odvoda toplote. To bi praktično pomenilo nezvezno delovanje motorja. Prav tako se v realnosti ne izvedeta popolna izotermna kompresija in ekspanzija. To bi lahko dosegli, če bi motor tekel zelo počasi, saj bi v takšnem primeru zagotavljali homogeno temperaturno polje znotraj posameznega valja, kar pa v praksi ni izvedljivo. (M. Mori, 2010)

### 3.9 Izkoristek Stirlingovega procesa

Teoretični izkoristek  $\eta$  Stirlingovega motorja je podan s Carnotovim zakonom in se v končni enačbi glasi (Lawson, 2010):

$$\eta = \frac{T_H - T_C}{T_H} \longrightarrow \eta = 1 - \frac{T_C}{T_H}, \quad (\text{Enačba 2})$$

kjer je  $T_C$  temperatura delovnega medija v hladnem valju in  $T_H$  temperatura delovnega medija v vročem valju (razvidno s slik 14, 15, 16, 17).

Carnotov zakon podaja načelo izkoristka idealnega toplotnega stroja.

Izkoristek toplotnega stroja, kjer se odvija desna krožna sprememba plina z reverzibilnim procesom, je odvisen od najvišje in najnižje temperature plina med delovnim ciklom (delovanjem). To pomeni, da izkoristek toplotnega stroja, ki deluje med dvema toplotnima razlikama, ne more biti večji od izkoristka Carnotovega toplotnega stroja. (Wikipedija - Termodinamika, 2019)

V članku *Energy efficiency comparison of Stirling engine types ( $\alpha$ ,  $\beta$ , and  $\gamma$ ) using detailed CFD modeling* (Abuelyamen & Ben, 2018) je izdelana numerična primerjava izhodne moči in izkoristka vseh treh vrst Stirlingovega motorja ( $\alpha$ ,  $\beta$  in  $\gamma$ ).

Rezultati v članku so pokazali, da je Stirlingov motor tipa  $\gamma$  ustvaril največjo izhodno moč in najvišji toplotni izkoristek. Sledil mu je motor Stirling tipa  $\beta$ . Najnižje zmogljivosti pa je prikazal Stirlingov motor tipa  $\alpha$ . To je razlog, da so motorji Stirling tipa  $\alpha$  konstruirani na način, da za povezavo med vročim in hladnim valjem uporabljajo obročasto povezovalno cev. Tak primer je motor podjetij Microgen Engine Systems in Viessmann (slika 6).

Izkoristki Stirlingovih motorjev podjetij Microgen Engine Systems, Viessmann in Swedish Stirling AB, ki jih najdemo v posameznih SPTE-sistemih v Evropi, se gibljejo med 32 in 37 %.

### **3.10 Uporaba Stirlingovega motorja v sodobnih SPTE-sistemih**

Nekatere študije nakazujejo povečanje uporabnosti Stirlingovega motorja v mikrosistemih SPTE v primerjavi s trenutnim stanjem. Kot gorivo bi se še naprej lahko uporabljalo fosilno gorivo, vendar bi bila z dvigom izkoristka poraba manjša. Pomemben premik se obeta pri uporabi obnovljivih virov in toplote odpadnih plinov drugih obratov z višjo ali s srednje visoko temperaturo (Tie, in drugi, 2012).

Uporabo Stirlingovega motorja v SPTE-sistemih lahko razdelimo v dva sistema:

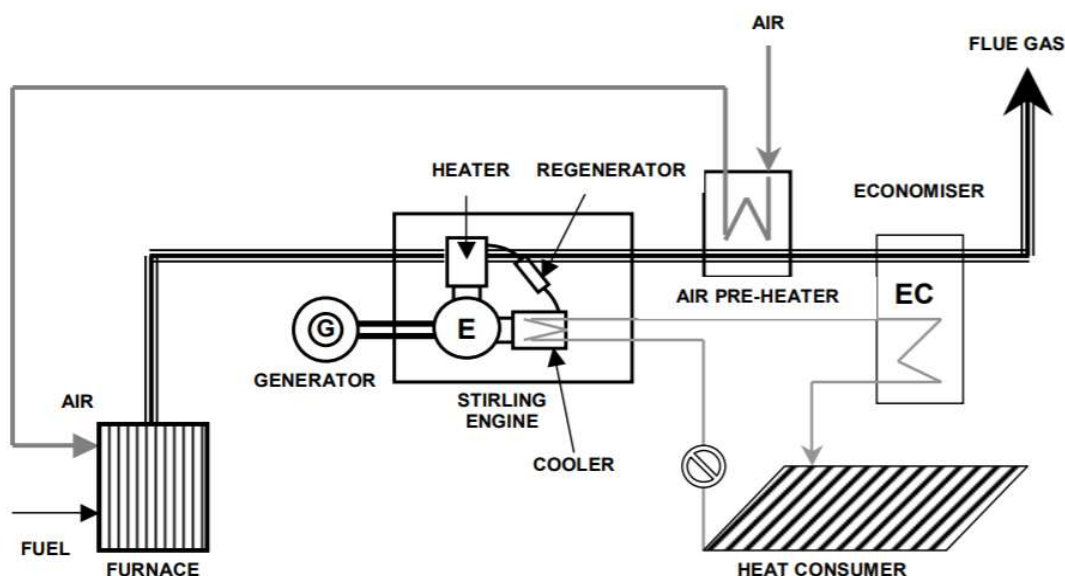
- sistem, kjer Stirlingov motor v SPTE-sistemu izkorišča primarno energijo goriva in ob tem poleg toplote proizvaja še električno energijo,
- sistem, kjer Stirlingov motor izkorišča odpadno toploto nekega drugega sistema, ki bi drugače končala kot izgubljena energija v ozračju. (Tie, in drugi, 2012)

Oba sistema temeljita na ustreznih kapacitetah prenosov oziroma dovodov toplote v vroči del motorja. V več razvojnih podjetjih trenutno potekajo temeljite raziskave in testiranja ustreznih prenosnikov toplote. Učinkoviti prenosniki toplote bi odprli veliko večje možnosti uporabe Stirlingovega motorja v SPTE-sistemih. Učinkovitost prenosnika toplote je odvisna od konstrukcije prenosnika in materiala, ki omogoča ustrezen prenos toplote. Biti mora tudi odporen na temperaturne obremenitve. Takšne materiale je težko zagotoviti in so precej dragi. Po na spletu dostopnih podatkih takšne materiale razvija razvojni laboratorij NASA in bi lahko bili v kratkem cenovno dostopni na trgu (Nagaraja, 2019).

### 3.11 Sestava in opis prenosov toplote v SPTE-sistemu s Stirlingovim motorjem

Klasični SPTE-sistem s Stirlingovim motorjem je sestavljen iz naslednjih komponent (slika 20):

- kurilna ali zgorevalna naprava
- Stirlingov motor
- električni generator
- hladilni sistem izpušnih plinov
- hladilni sistem Stirlingovega motorja



Slika 20: SPTE s Stirlingovim motorjem (Thombare, 2008)

#### 3.11.1 Kurilna ali zgorevalna naprava

Zgorevanje goriva poteka v napravi za zgorevanje. Izvedba in način zgorevanja sta odvisna od vrste uporabljenega goriva. Tudi temperatura zgorevanja je odvisna od vrste goriva in znaša od 900 do 1400 °C. (Kraut, 1994)

#### 3.11.2 Prenos toplotnega vira v Stirlingov motor

Po zgorevanju goriva v kurilni napravi pridejo dimni plini v prenosnik toplote Stirlingovega motorja (vroči del Stirlingovega motorja). Tukaj se dimni plini ohlajajo in ko zapustijo Stirlingov motor, je želja, da je temperatura teh plinov čim nižja. Večja kot je razlika med vstopom dimnih plinov v motor in izstopom iz njega, boljši je izkoristek prenosnika toplote na motorju. (Thombare, 2008)

### **3.11.3 Hlajenje Stirlingovega motorja**

Na hladnem delu Stirlingovega motorja imamo prenosnik toplote za odvod toplote iz motorja. Količina te odvedene toplote daje stopnjo izkoristka Stirlingovemu motorju. V SPTE-sistemih s Stirlingovimi motorji je to toplota, ki jo v nadaljevanju koristno uporabimo za ogrevanje objektov. (Thombare, 2008)

Kot delovni plin se v Stirlingovih motorjih uporabljajo plini z višjo plinsko konstanto. Najbolj razširjena je uporaba helija. Da se onemogoči izhajanje delovnega plina v okolico, je zelo razširjena izvedba, kjer je motor vgrajen v hermetično zaprt sistem (slika 21).



Slika 21: Primer hermetično zaprtega sistema Stirlingovega motorja (BHKW-Prinz, 2019)

### **3.11.4 Hlajenje dimnih plinov**

Temperatura dimnih plinov, ki zapustijo motor, lahko še vedno znaša od 120 do 160 °C. Za doseg čim večjega izkoristka SPTE-sistema je potrebno koristno uporabiti še energijo plinov, ki potuje v izpušni sistem. V primerih uporabe kondenzacijskih prenosnikov toplote se te pline ohladi na do 45 °C. Toploto, pridobljeno iz hlajenja plinov, je mogoče uporabiti za ogrevanje objektov ali za predgrevanje vstopnega zraka v kurilno napravo.

## **3.12 Uporaba goriv v SPTE-sistemih s Stirlingovim motorjem**

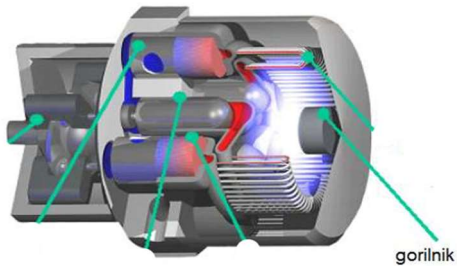

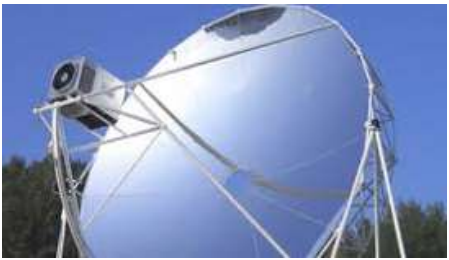
Gorivo je snov, pri kateri se v procesu zgorevanja poleg materialnih produktov zgorevanja sprošča toplota. Za goriva smatramo tiste snovi, ki jih sežigamo za pridobivanje toplote (Senegačnik, 2005).

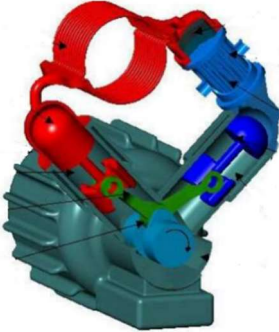
Razvoj kemijskih in mehanskih postopkov predelave goriv je prepeljal do tega, da imamo danes na razpolago veliko različnih vrst goriv. Za uporabnost goriva moramo poznati njegovo sestavo in lastnosti (kurilno vrednost). Glede na poznano sestavo in ostale karakteristike goriva lahko definiramo in konstruiramo določen energetski kurilni postroj (Senegačnik, 2005).

Sestavo trdnih in kapljevinskih goriv izražamo v masnih deležih komponent, sestavo plinastih goriv pa v volumenskih deležih. Gorivo je v splošnem sestavljeno iz gorljivega dela in balasta – negorljivega dela (Senegačnik, 2005).

V SPTE-sistemih s Stirlingovim motorjem je s tehnološko prilagoditvijo kurilne priprave in načina zgorevanja mogoča uporaba raznovrstnih goriv. V tabeli 2 so podana posamezna goriva, opisani postopki dovoda in slikovni prikaz zgorevanja ter nastanek posameznega vira toplote.

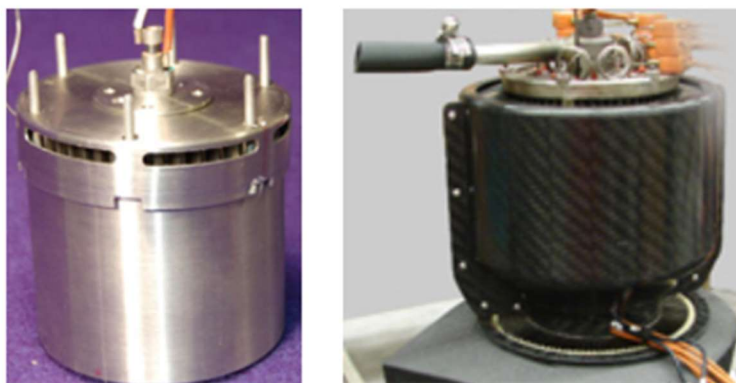
Tabela 2: Primeri uporabe goriva oz. toplotnega vira pri različnih SPTR-sistemih (povzeto po Novak, 2012)

<b>Gorivo</b>	<b>Priprava toplotnega vira</b>	<b>Slika dovoda toplote v motor</b>
zemeljski plin kurilno olje biodizel  utekočinjen naftni plin	dovod v gorilnik	
polena peleti sekanci ostalo	obdelava in priprava biomase (piroliza in fermentacija)	
sončni žarki	zbiranje sončnih žarkov z lečami ali ogledali	

odpadna toplota	distribucija toplote do prenosnika toplote/vroči valj motorja	
-----------------	---	--

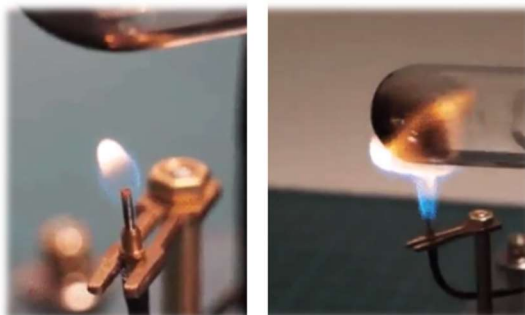
### 3.12.1 Uporaba plinskega goriva v SPTE-sistemu s Stirlingovim motorjem

Sistem je prilagojen na uporabo goriva, kot so zemeljski plin, bioplin ali utekočinjen naftni plin. V obratovanju je že kar nekaj tovrstnih naprav in v največji meri uporabljajo zemeljski plin. Razlog je v dostopnosti, ceni in kalorični vrednosti zemeljskega plina. Prednost plinskega sistema je, da zgorevanje plina poteka v gorilniku, ki je lahko nameščen neposredno ali posredno v vročem delu Stirlingovega motorja. Kar nekaj podjetij je razvilo plinske gorilnike, ki so namenjeni izključno uporabi v Stirlingovih motorjih (slika 22).



Slika 22: Plinski gorilnik za Stirlingov motor (www.pci, 2019)

Razvoj gorilnikov daje prednost kakovosti zgorevanja plina, kar posledično pomeni manjše emisijske izpuste v ozračje. Na sliki 23 je prikazan primer popolnega in nepopolnega zgorevanja plina.



Slika 23: Popolno in nepopolno zgorevanje

Zgorevanje plina je v teoretičnem smislu izvedba eksotermne reakcije plina in kisika, ki se ga vzame iz zraka. Kadar pri zgorevanju plina nastajajo pogoji, ki zagotovijo stehiometričnost zgorevanja, govorimo o popolnem zgoretju plina. Stehiometričnost pomeni idealno kemijsko razmerje med gorivom in kisikom pred zgorevanjem in produkti po zgorevanju. Razmerja so lahko masna, volumska ali molska. Pri zgorevanju velja zakon o ohranitvi mase, kar pomeni, da je skupna masa goriva in zraka enaka masi nastalih produktov – plinov (Senegačnik, 2005). To se teoretično doseže na način, da je v gorilnik dovedena teoretična količina zraka, v praksi pa je to dosegljivo, če je gorilnik nastavljen na delovanje z rahlim presežkom dovoda zraka. (Kraut, 1994)

Nepopolno zgorevanje povzroči pri zgorevanju nastanek ogljikovega monoksida (CO), dušikovih oksidov (NOx), po zgorevanju pa lahko ostanejo še nezagoreli plini, majhne količine težkih kovin (živo srebro, svinec, baker, cink, krom ...) in saje. To so toksični plini, saje pa v ozračju predstavljajo trde delce, ki prav tako zelo vplivajo na zdravje ljudi.

Naslednja težava nepopolnega zgorevanja je nižja temperatura zgorevanja, ki v delovnem procesu Stirlingovega motorja vpliva na izkoristek in posledično na rentabilnost SPTE-sistema.

### **3.12.2 Uporaba biomase v SPTE-sistemu s Stirlingovim motorjem**

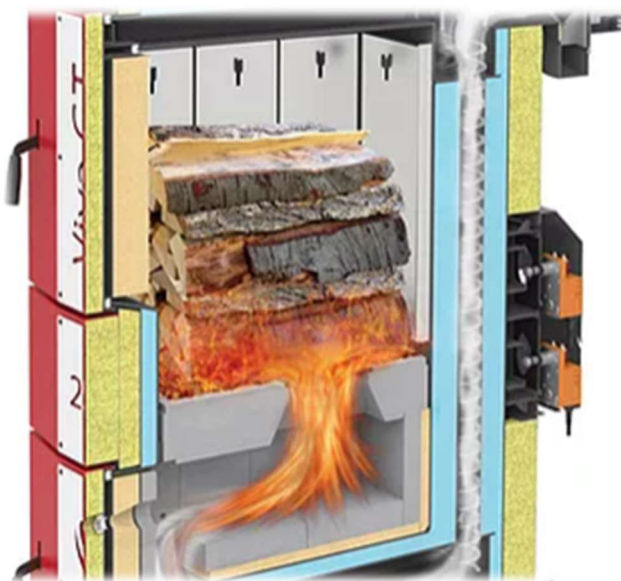
Kot kurilno biomaso imamo pri SPTE-sistemih s Stirlingovim motorjem v mislih lesno biomaso. Les kot kurivo se v zgodovini uporablja že dolgo. V naravi predstavlja uskladiščeno sončno energijo. Pri zgorevanju lesa se sprosti enaka količina toplogrednih plinov, kot nastanejo pri gnitju lesa v naravi. Uporaba lesne biomase kot goriva ne povečuje toplogrednega učinka (Biomasa, d. o. o, 2019).

#### **3.12.2.1 Oblike lesne biomase in kurilne naprave**

Najpogostejše oblike lesne biomase, uporabne v SPTE-sistemih s Stirlingovim motorjem, so polena, sekanci in peleti. Pogostost uporabe teh goriv je zato, da omogočajo neprekinjeno delovanje in avtomatizacijo delovanja sistema. V odvisnosti uporabe oblike goriva se pri načrtovanju SPTE-sistemov dimenzionirata vrsta in velikost kurilne naprave.

### **3.12.2.2 Polena**

Polena so razžagani in razcepljeni kosi lesa, dolgi 30–50 cm, ki jih pridobivamo neposredno iz okroglega lesa slabše kakovosti ali iz predhodno izdelanih metrskih okroglic ali cepanic. So tradicionalna oblika lesnega goriva (Košmrlj, 2009). Kot kurilna naprava se uporablja peč na polena, ki v sistemu Stirlingov motor oskrbuje s toploto (slika 24).

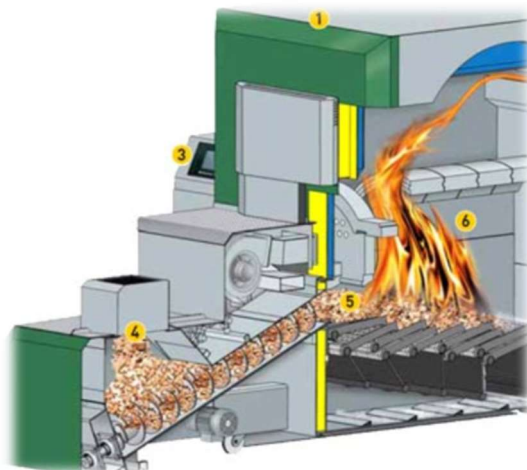


Slika 24: Polena kot vir toplote (Waltis, d. o. o., 2019)

### **3.12.2.3 Sekanci**

Sekanci so kosi sekanega lesa, veliki do 10 cm. Običajno sekance izdelujemo iz drobnega lesa (les z majhnim premerom: npr. droben les zaradi redčenja gozdov, veje, krošnje), lesa slabše kakovosti ali iz lesnih ostankov. Kakovost sekancev je odvisna od kakovosti vhodne surovine in tehnologije drobljenja. V praksi vrednotimo les po prostornini in ne po masi, zato uporabljamo pri merjenju prostornine sekancev enoto nasuti meter ( $m^3$ ). V enem nasutem kubičnem metru ( $m^3$ ) je približno 200–300 kg sekancev, odvisno od vrste lesa, velikosti in homogenosti kosov in vlage (Košmrlj, 2009). Kot kurilna naprava se v SPTE-sistemu uporablja gorilnik na sekance, ki Stirlingov motor oskrbuje s toploto (slika 25).





Slika 25: Sekanci kot vir toplote (Waltis, d. o. o., 2019)

### 3.12.2.4 Peleti

Peleti so stiskanci, narejeni iz čistega lesa. Proizvajajo se industrijsko s stiskanjem suhega lesnega prahu in žaganja. So valjaste oblike premera 8 mm in dolžine do 50 mm. V postopku izdelave se uporablja zgolj visokotlačna para. Za izboljšanje mehanske trdnosti se jim lahko doda še 1–3 % krompirjevega ali koruznega škroba. Lesni prah se stiska v stiskalnicah (peletirkah) pod velikim tlakom in pri povečani temperaturi. S tem se zmanjšata vsebnost vode in prostornina, poveča pa se gostota, ki vpliva na višjo kurilno vrednost (Košmrli, 2009). V SPTe-sistemu se kot kurilna naprava uporablja gorilnik na pelete, ki Stirlingov motor oskrbuje s toploto (slika 26).



Slika 26: Peleti kot vir toplote (BHKW-Prinz, 2019)

### **3.12.3 Uporaba sončnih žarkov v SPTE-sistemu s Stirlingovim motorjem**

Sonce oziroma sončni žarki so poceni toplotni vir, ki ga je mogoče v Stirlingovem motorju enostavno izkoriščati. Sončne žarke se skoncentrira v vročem delu motorja z uporabo (*concentrated solar power*) CSP-tehnologije. To koncentracijo je mogoče narediti s pomočjo paraboličnih zrcal, ki omogočijo, da se večja količina sončnih žarkov skoncentrira v eni točki. V tej točki se nahaja Stirlingov motor, ki izkoristi nastali toplotni tok. Opisan sistem je leta 1987 patentiral Roelf J. Meijer (slika 27).



Slika 27: Primer zbiranja sončnih žarkov (*Solarstirlingplant, 2019*)

Sodobnejši sistemi so računalniško podprti, gibanje zrcal je računalniško krmiljeno v optimalni smeri proti soncu. Tak sistem doseže visok izkoristek osončenja. Osončenje je definirano kot celotno sončno obsevanje, ki od zgoraj pade na vodoravno ploskev. Energija sončnega obsevanja je odvisna od meteoroloških dejavnikov (oblačnosti, vlage in prepustnosti ozračja za sevanje), od reliefnih dejavnikov (nadmorske višine) in astronomskih dejavnikov. V Sloveniji je obsevanje največje v maju, juniju, juliju in avgustu. Ostali meseci predstavljajo bistveno nižjo stopnjo sončnega obsevanja. V Ljubljani znaša sončno obsevanje povprečno 1832 ur letno (ARSO, 2019).

V prvotnih solarnih sistemih so bili vgrajeni motorji tipa beta, novejše različice pa uporabljajo tudi druge vrste. Z vključitvijo razvojne agencije NASA v sistem izkoriščanja solarne energije pa se vse več uporablja prav njihov motor z linearnim generatorji (predstavljen v poglavju 3.3).

Hlajenje Stirlingovega motorja v teh sistemih je lahko izvedeno z zračno ali tekočinsko izvedbo. Pri zračnem sistemu hlajenja gre enostavno za izpust oziroma prenos toplote v

ozračje. V tem primeru ne gre za klasični SPTE-sistem, gre le za sistem pridobivanja električne energije.

Izvedba tekočinskega hlajenja omogoča, da toploto iz motorja koristno uporabimo še v druge namene. V tem primeru lahko govorimo o SPTE-sistemu. Takšni sistemi že obratujejo v sredozemskem območju, povečini pa pridobljeno toploto uporabljajo v manjših industrijskih obratih. Osnovno delovanje sistema temelji na zrcalnem zbiranju sončnih žarkov, ki se skoncentrirajo v vroči valj Stirlingovega motorja. Izkoristek zbiranja žarkov je visok in je zelo blizu 100 %. Izkoristek celotnega sistema je tako odvisen predvsem od izkoristka motorja, kar znaša pri motorjih, ki so že na trgu, vse do 37 %. To je višje v primerjavi s fotovoltaičnimi sistemi, katerih izkoristki se gibljejo med 5 in 17 % in so odvisni od vrste uporabljene fotovoltaične celice. (Our Company, inc., 2020)

Sistemi s Stirlingovim motorjem so robustnejši in bolj podvrženi drugim vremenskim vplivom (vetru) ter imajo na okolico večji negativni vizualni vpliv v primerjavi s fotovoltaiko, ki je v primeru strešne integracije popolnoma neopazna.

Sonce je vir energije, ki bi ga ljudje morali bolje izkoristiti, saj gre za neomejen vir energije (Our Company, inc., 2020). Iz omenjenega vidika je smiselno za izkoriščanje sončne energije uporabiti vse razpoložljive tehnologije.

## **4 Implementacija Stirlingovega motorja v mikrosistem SPTE**

Izraz implementacija predstavlja uporabo oziroma uresničitev določenih tehničnih rešitev v nek sistem. Konstrukcija, izkoristek in delovanje Stirlingovega motorja se zdijo na prvi pogled zelo primerni razlogi za večjo uporabo v SPTE-sistemih. Vendar so ti motorji v SPTE-sistemih le redko uporabljeni ne le pri nas, pač pa tudi v tujini. Postavlja se vprašanje, zakaj je tako. Zanimalo me je strokovno mnenje o uporabi Stirlingovega motorja na splošno in tudi v SPTE-sistemih. V okviru empiričnega dela te naloge sem pridobil strokovna mnenja s področja, ki se navezujejo na SPTE-sisteme, prikazal izdelavo Stirlingovega motorja in opisal vgradnjo izdelanega motorja v kurilno napravo.

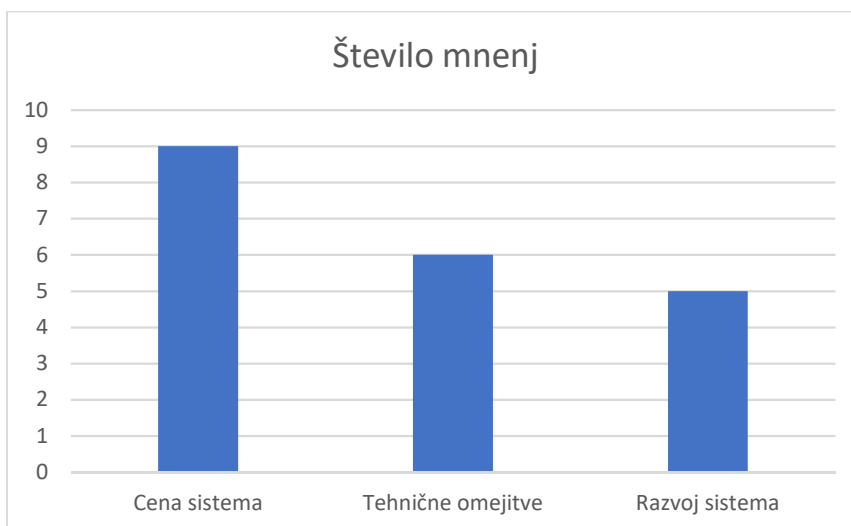
### **4.1 Povzetek in grafična analiza strokovnih mnenj**

Analizo uporabe Stirlingovega motorja v SPTE-sistemih sem opravil na osnovi mnenj strokovnjakov s področja energetskega svetovanja, strojogradnje na področju energetike in ekonomije.

K sodelovanju sem povabil petnajst strokovnjakov. Večino kontaktov sem našel na internetu, kjer sem tudi preveril njihove reference. K sodelovanju sem jih povabil preko elektronske pošte in telefonskega pogovora. Odzivi so bili različni, nekateri so bili za sodelovanje zelo navdušeni, drugi spet ne. Razlogov za nesodelovanje določenih strokovnjakov nisem iskal, ocenjujem pa, da je razlog v nepoznavanju področja.

Pripravljenost na sodelovanje o strokovni razpravi je izrazilo deset strokovnjakov. Z vsemi sem se dogovoril za sestanek, kjer sem pridobil njihova mnenja za nadaljnjo analizo tematike. Skladno z dispozicijo magistrske naloge so strokovnjaki svoja strokovna mnenja podali na vprašanje: "Kakšno je vaše strokovno mnenje o možnostih vgradnje Stirlingovega motorja v mikrokogeneracijske sisteme?"

Strokovna mnenja so si bila po večini dokaj enotna. Izstopajo trije pogledi na omenjeno problematiko. Nizka uporaba Stirlingovega motorja v SPTE-sistemih je posledica cene motorja, ki podraži sistem, problemi pri tehničnih omejitvah sistema in razvojni vidik Stirlingovega motorja. Število mnenj, vezanih na te tri dejavnike, prikazuje spodnji graf.



Slika 28: Mnenja sodelujočih strokovnjakov o bistvenih vprašanjih implementacije Stirlingovega motorja

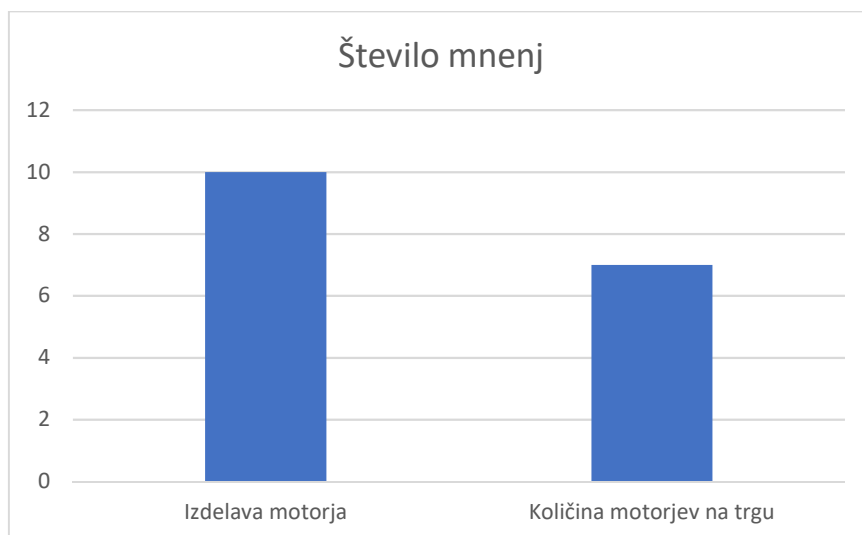
#### **4.1.1 Cena SPTE-sistema s Stirlingovim motorjem**

Cena sistema, ki uporablja Stirlingov motor, je bistveno višja v primerjavi s sistemom, ki uporablja druge motorje (npr. motor z notranjim zgorevanjem ipd.).

Obstaja nekaj SPTE-sistemov, ki imajo sicer določene obratovalne pogoje, kjer bi lahko načrtovalci in konstruktorji sistemov uporabili Stirlingov motor, vendar se v večini odločijo za uporabo motorjev z notranjim zgorevanjem. Glavni razlog je v previsoki ceni Stirlingovega motorja.

Z ekonomskega vidika je za investitorja naložba rentabilna, če se povrne v obdobju od osem do deset let. Po mnenju ekonomistov in komercialistov, ki delujejo na področju prodaje energetskih sistemov, je ta kriterij težko dosegljiv.

Proizvodnja motorjev je z vidika strojegradnje zahteven in kompleksen proces. Zajema pripravo dokumentacije, izdelavo orodij, izdelavo in testiranje motorja. Proizvodnja motorjev Stirling ni masovna, kar se odraža v ceni na enoto. Posledično so ti motorji veliko dražji v primerjavi z na trgu veliko številčnejšimi motorji z notranjim zgorevanjem. Na grafu sta prikazana glavna dejavnika, ki vplivata na ceno Stirlingovega motorja na trgu.



Slika 29: Bistveni vplivi na ceno Stirlingovega motorja

Iz grafa je razvidna ocena stroke o vplivu na ceno motorjev na trgu. Povečanje števila teh motorjev na trgu bi prineslo cenovno dostopnost motorjev in posledično večjo uporabnost takšnih SPTE-sistemov.

#### **4.1.2 Tehnične omejitve**

Izkoristek Stirlingovega motorja je odvisen od temperaturnih razlik v vročem in hladnem delu motorja. To predstavlja veliko izpostavljenost posameznih delov motorja temperaturnim obremenitvam. Tehnologija sodobnih materialov je sicer naredila velik preskok, kar predstavlja upanje, da lahko v prihodnosti pričakujemo ustrezne tehniške rešitve na tem področju. V vesoljski tehnologiji razvijajo in testirajo materiale, ki so odporni na temperaturne obremenitve razpona več kot tisoč stopinj Celzija in samo vprašanje časa je, kdaj bodo uporabni tudi na drugih področjih. Materiali, ki bi bili odporni na velike temperaturne obremenitve, bi bili zelo uporabni pri Stirlingovih motorjih.

#### **4.1.3 Razvoj sistema**

Strokovnjaki ugotavljajo, da je kar nekaj razvojnih podjetjih, ki so razvijala SPTE-sisteme s Stirlingovim motorjem, propadlo ali razvoja niso pripeljali do konca. Razlog je v hitrem razvoju področja energetike, kamor spada tudi mikrokogeneracija. Poznamo veliko sistemov, ki so v določenih ekonomskih momentih podprti tudi s strani energetske politike države. Razvoj Stirlingovega motorja se nekako skozi celotno zgodovino razvoja srečuje s konkurenco, ki je preprečila njegov celovit napredek ali ga spravila v slepo ulico. V času industrijske revolucije je Stirlingov motor prehitel motor z notranjim izgorevanjem, ker je veliko bolj uporaben tudi v avtomobilski industriji. V zadnjem času pa je kazalo, da bo Stirlingov motor odigral pomembno vlogo pri izkoriščanju sončnih žarkov, vendar se v praksi veliko več uporablja fotovoltaični sistem.

Ima pa SPTE-sistem s Stirlingovim motorjem možnost za uspeh, kot ga nakazujejo nekatera nemška in skandinavska podjetja. Razvoj so namreč usmerili v posamezni sistem možnosti uporabe več kombinacij toplotnih virov. Poenostavljeno povedano lahko sistem uporablja kot toplotni vir sončne žarke, v nočnem času pa koristi drug razpoložljiv vir, npr. zemeljski plin.

Takšno razmišljanje o razvoju temelji na podnebnih smernicah za zmanjšanje toplogrednih vplivov na okolje in je v skladu s trajnostnimi smernicami energetskega koncepta. Gledano iz tega zornega kota bi SPTE-sistemi s Stirlingovim motorjem v prihodnosti lahko predstavljali pomembno vlogo.

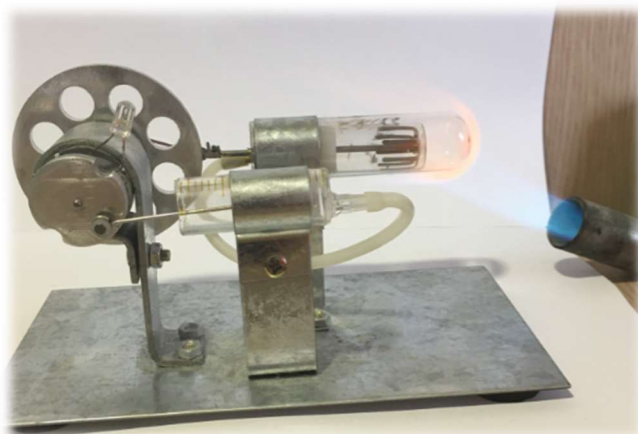
## **4.2 Izdelava Stirlingovega motorja**

S Stirlingovim motorjem sem se srečal že leta 2002 na Fakulteti za strojništvo v Mariboru, vendar se takrat z njim nisem veliko ukvarjal. Leta 2010 sem čisto po naključju na spletu naletel na članek, ki je opisoval uporabo Stirlingovega motorja skozi zgodovino. Opis in primeri uporabe so me spodbudili k razmišljanju, zakaj ta motor ni več v uporabi v praksi.

V članku mi je bilo zelo zanimivo, da je uporaba Stirlingovega motorja v preteklosti že bila implementirana v vozilo. Motor je poganjal elektro generator, ki je polnil manjšo baterijo in z elektriko poganjal vozilo. V bistvu je šlo za sistem kogeneracije oziroma hibridni pogon vozila. Gre za sistem, ki v sedanjem času z vidika okoljskih izzivov postaja zelo zanimiv.

Uporaba motorja v avtomobilski industriji, uporaba motorja v energetskih sistemih in želja po raziskovanju nečesa novega me je pripeljala do tega, da sem se v okviru te naloge odločil izdelati motor in ga konkretno preskusiti v praksi.

Izdelava motorja je temeljila na geometriji in delovanju modelčka, izdelanega na osnovi kupljenih komponent (slika 30).



Slika 30: Modelček motorčka Stirling

Izdelan modelček je po dovodu toplote s plinskim gorilnikom deloval zelo vzpodbudno. Na osnovi tega preizkusa sem se odločil izdelati večji motor, ki sem ga v nadaljnji fazi vgradil v hišno kurilno napravo.

Potek izdelave motorja bi lahko nekako razdelil v tri faze:

- izdelava okvirnih skic in odločitev o tipu motorja
- iskanje strugarja, ki bi sodeloval pri izdelavi
- izdelava in sestava motorja v delavnici

V prvi fazi izdelave je bilo potrebno določiti tip motorja, ki bi ga izdelal. Po izdelavi je sledila montaža motorja v kurilno napravo. Pri odločanju o tipu izdelanega motorja sem okleval med izvedbama alfa in gama. Na koncu sem se odločil za kombinacijo med tema dvema različicama motorja. Tako je nastala neke vrste eksperimentalna oblika Stirlingovega motorja, ki je hibrid med izvedbama alfa in gama.

Vroči in hladilni val sta postavljena pod kotom  $90^\circ$ . Bat v vročem delu ni v stiku z valjem, pač pa opravlja nalogo krmilnega bata. V spodnjem delu vročega valja sta hladilnik in regenerator, ki je v nadaljevanju povezan na zgornjem delu hladilnega valja.

Teoretični del naloge in mnenje strokovnjakov je, da je cena Stirlingovih motorjev v primerjavi z motorjem z notranjim zgorevanjem na trgu zelo visoka. V svetu je kar nekaj proizvajalcev motorjev, intenzivni razvoj pa trenutno poteka na Kitajskem. Splošna tehnologija izdelave motorjev je pri proizvajalcih znana, podrobnosti in posamezne tehnične rešitve pa so zelo varovana poslovna skrivnost.

To dejstvo lahko potrdim na primeru, kjer sem uspel najti strokovnjaka, ki sodeluje pri razvoju Stirlingovih motorjev v enem od evropskih podjetji. Z njim sem se uspel dogovoriti za sestanek, od katerega sem si obetal pridobiti veliko koristnih informacij v zvezi z magistrsko nalogo. Izkupiček sestanka so bile le pridobljene osnovne informacije o delovanju motorja Stirling, ostalih informacij pa logično glede na sredstva, ki jih podjetje vlaga v razvoj, ni bilo mogoče pridobiti.

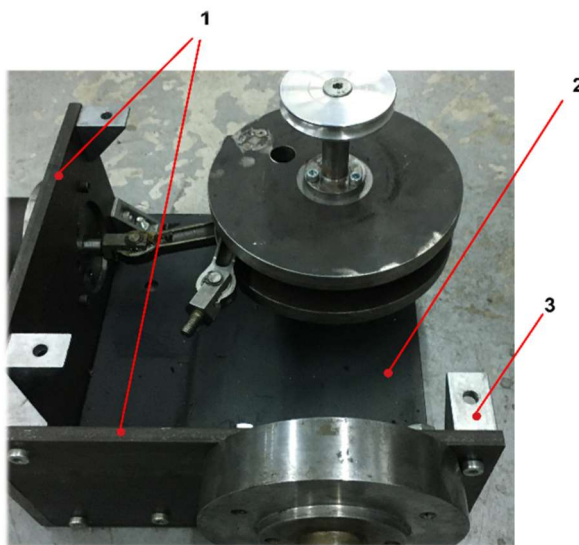
Motor sem poskušal narediti kar se da poceni. To sem izvedel na način, da sem pri izdelavi uporabil posamezne elemente iz različnih tehničnih področjih in dele motorja z notranjim izgorevanjem. V nadaljevanju bom pri posameznem sestavnem delu motorja opisno in slikovno prikazal postopek izdelave in izbor uporabljenega materiala.

Metodologija izdelave motorja je zajemala vse potrebno za izdelavo (nabava materiala, izdelava skic, struženje, rezkanje, rezanje, varjenje, piljenje). Večina opravljenih del je bila izvedena v delavnici strugarja, ki mi je v ta namen odstopil prostor in opravil vsa potrebna strgarska dela.



#### **4.2.1 Ohišje motorja**

Ohišje predstavlja osrednji in nosilni del motorja (slika 31). Sestavljeno je iz dveh glavnih 12-milimetrskih nosilnih pločevin (točka 1 na sliki 31) in dveh 5-milimetrskih stranskih pločevin (točka 2 na sliki 31). Nosilna pločevina nosi oba valja, v stransko pločevino pa so vgrajeni ležaji glavne gredi. Obe pločevini sta medsebojno privijačeni z vijajnimi elementi (točka 3 na sliki 31) in tako sem dobil kompaktno ohišje motorja.



Slika 31: Ohišje motorja

#### **4.2.2 Ročični mehanizem**

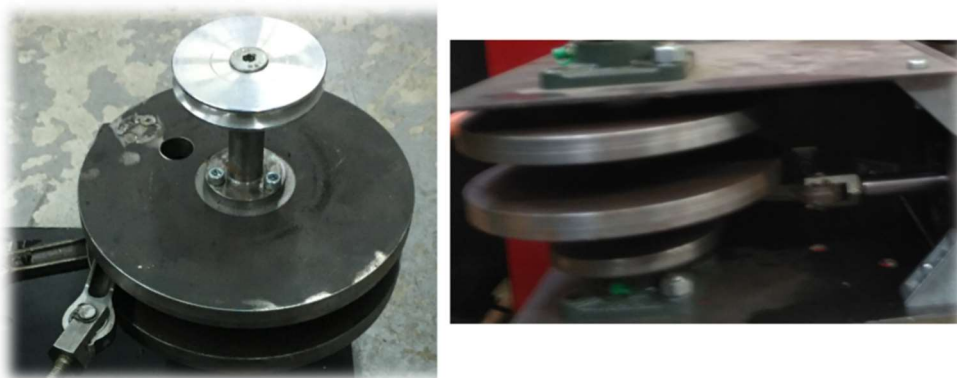
Pod ročični mehanizem spadajo vsi gibljivi deli motorja. Ti deli so:

- glavna gred z vztrajnikom
- ojnice
- batnice
- bati

#### **4.2.3 Glavna gred z vztrajnikom**

Glavno gred in vztrajnik bi lahko izvedel v različnih kombinacijah. Odločili smo se za integriranje vztrajnika v glavno gred, ker to geometrijsko zavzame najmanj prostora (slika 30). Vztrajnik tvori skupaj z glavno gredjo celoto, na katero sta pritrjeni obe ojnici. Glavna gred je v ohišje vležajena s krogličnimi ležaji. Vsi sestavni deli glavne gredi in vztrajnika so izdelani iz materiala in posamičnih elementov, ki se uporabljajo v orodjarstvu. Ves postopek

izdelave je bil izveden v strojegradni delavnici po postopku rezkanja, struženja in sestavljanja posameznih delov.



Slika 32: Ročni mehanizem motorja

#### **4.2.4 Ojnice**

Ojnici povezujeta glavno gred s posamičnima batnicama. Uporabljeni ojnici sta bili vzeti iz manjšega batnega kompresorja. V ležajna dela smo vgradili kroglične ležaje (slika 33).



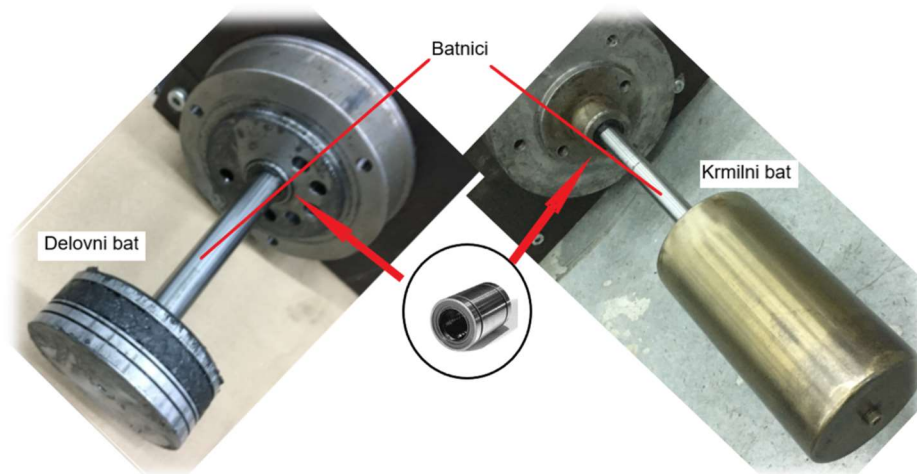
Slika 33: Ojnice

#### **4.2.5 Batnice z batoma**

Batnice povezujejo ojnice z batom (slika 34). Kot osnovni material smo vzeli vodilne osi. V ohišje motorja so vležajene preko krogličnih vodilnih puš. Oba elementa (vodilna os in kroglična vodilna puša) se v praksi uporabljata v orodjarski tehnologiji.

Delovni bat je strojno obdelan bat, vzet iz Volkswagnovega motorja z notranjim izgorevanjem. Odstranjeni so bili batni obročki. Vgradili smo grafitno vrvico, ki opravlja nalogo mazanja valja in zagotavlja tesnjenje bata.

Krmilni bat se pomika v vročem valju in ni v stiku z valjem. Premer bata je tri milimetre manjši od notranjega premera valja, kar zagotavlja pretakanje zraka iz vročega v hladni del valja. Izdelan je iz na temperaturo visoko odporne cevi, ki je z vsake strani zaprta in na ta način oblikuje neke vrste distančnik.



Slika 34: Batnice z batoma

#### 4.2.6 Valja motorja

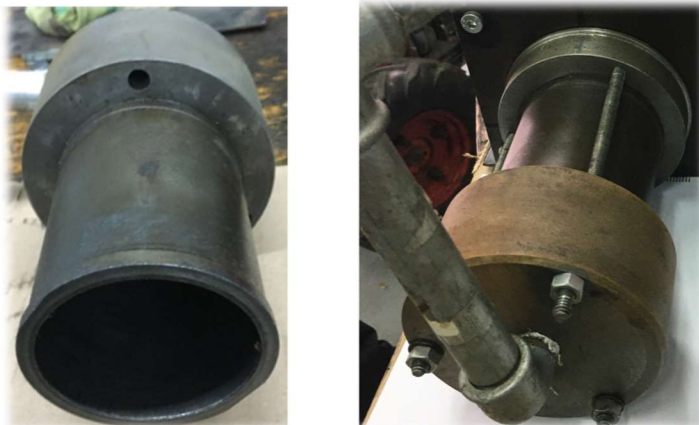
Delovni pogoji v obeh valjih so zelo različni. Temperatura vročega valja je bistveno višja od temperature hladnega. Temu primerna je bila tudi izbira materialov za izdelavo valjev.

Vroči valj je izdelan iz na temperaturo visoko odpornega jekla, ki ima tudi ustrezno toplotno prevodnost. Postopek izdelave valja je zajemal obdelavo posameznih elementov in varjenje v končno obliko. Na vroči valj je privarjena prirobnica, ki omogoča pritrditev motorja v kurilno napravo (slika 35).



Slika 35: Vroči valj

Delovni valj ima v primerjavi z vročim valjem opravka z bistveno nižjo temperaturo. Vezano na uporabljen bat smo tudi valj (samo mokro valjno pušo) vzeli iz Volkswagnovega motorja z notranjim zgorevanjem. Z vrha smo valj vijačno zaprli s postruženo glavo, v katero je vdolan navoj za priključek za povezovanje cevi z vročim valjem (slika 36).

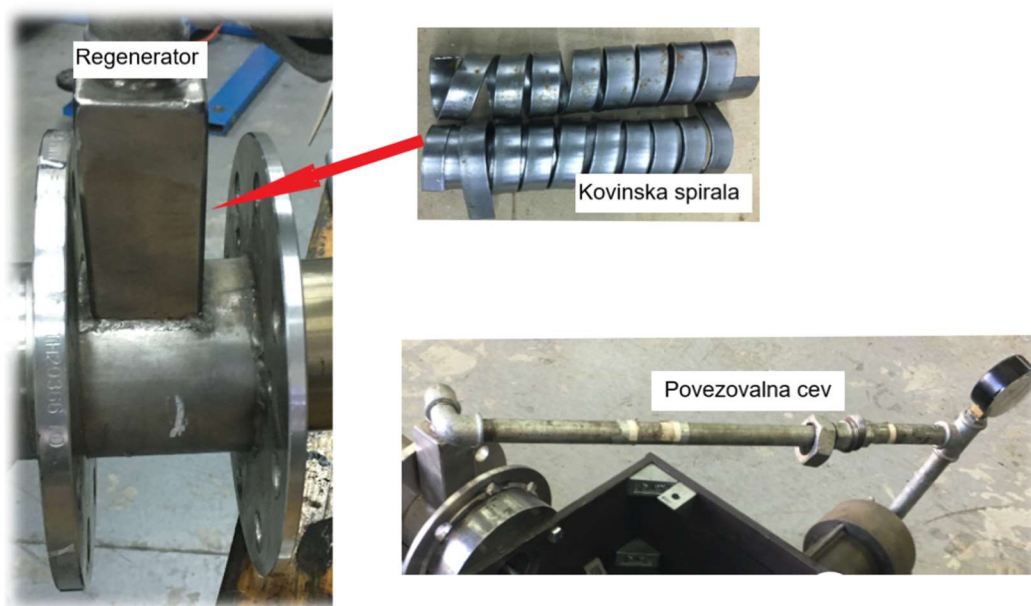


Slika 36: Hladni valj

#### 4.2.7 Povezovalni element

Povezovalni element povezuje oba valja motorja in omogoča prehod zraka med valjema. Na izhodu iz vročega valja je najprej nameščen regeneratorski element, v katerega smo vstavili kovinsko spiralo, ki omogoča absorpcijo in oddajo toplote ob prehajanju zraka.

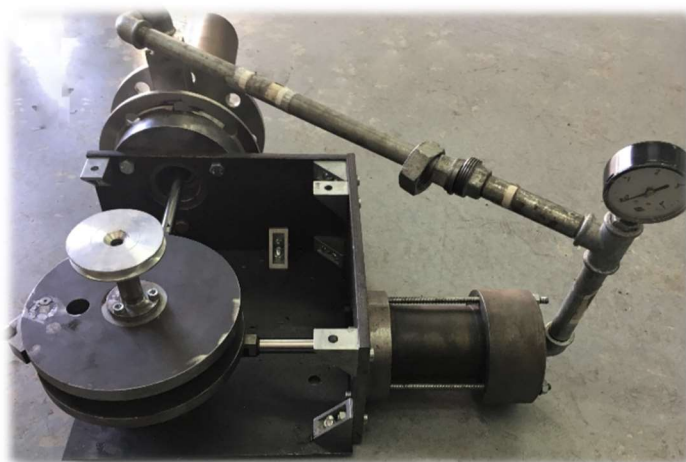
Regenerator in delovni valj sta medsebojno povezana s kovinsko cevjo notranjega premera  $\phi 12$  mm (slika 37).



Slika 37: Povezava med vročim in hladnim delom motorja

#### 4.2.8 Končna oblika izdelanega Stirlingovega motorja

Na sliki je končna oblika motorja.



Slika 38: Končna odprta oblika motorja

#### 4.2.9 Test motorja in tehnični podatki

Ko je bil motor končan, smo naredili testni zagon in opravili osnovne meritve. Zagon je bil narejen na način, da se je vroči del motorja segreval s plinskim gorilnikom. Kot plin sem uporabil butan. Čas testiranja sem omejil na deset minut.

Merjenje navora motorja je bilo izpeljano s pomočjo mehanske navorne ročice, ki se je v praksi uporabljala za nadzorovano pritegovanje občutljivih vijakov v avtoservisni delavnici.

Teoretični izračun moči in izkoristka motorja sem opravil na osnovi tehničnih enačb, predstavljenih v poglavjih 3.7, 3.8 in 3.9 in s pomočjo računsko-teoretske platforme spletne strani MIDE engineering solutions (Mide Technology USA, 2019).

Izmerjeni parametri, ki so potrebni za izračun karakteristik, so:

- temperatura vročega dela motorja:  $T_H = 560 \text{ }^\circ\text{C}$  oz.  $833 \text{ K}$
- temperatura hladnega dela motorja:  $T_C = 80 \text{ }^\circ\text{C}$  oz.  $353 \text{ K}$
- skupni volumen motorja:  $1736 \text{ cm}^3$
- najmanjši volumen:  $1160 \text{ cm}^3$
- količina dovedene toplote v motor,  $Q$
- kompresijsko razmerje,  $\epsilon$
- delovni medij je zrak,  $R = 278 \text{ J/kg K}$
- stacionarni tlak:  $1,2 \text{ bara}$

Količino dovedene toplote v motor sem izračunal na osnovi porabe goriva in kurilne vrednosti butana. Poraba goriva je v času preizkusa (10 minut) znašala 42 gramov. Kurilna vrednost butana je 45,7 MJ/kg. Kurilna vrednost nam pove, koliko toplote nastane pri standardnih pogojih popolnega zgorevanja goriva (Kraut, 1994).

$$Q = \text{poraba} * \text{kurilna vrednost butana} = 42 \text{ g} * 45,700 \text{ MJ/kg} = 1,9 \text{ MJ}$$

Če to dovedeno količino toplote delimo s časovnim trajanjem testiranja, dobimo dovedeno moč motorju ( $P_{dovedena}$ ).

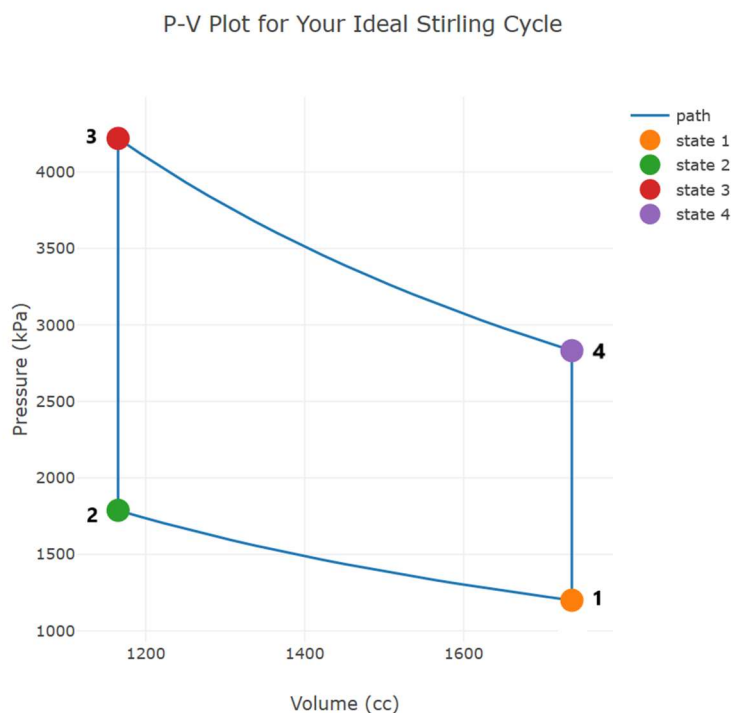
$$P_{dovedena} = Q / \text{čas testiranja} = 1,9 \text{ MJ} / 600 \text{ s} = 3160 \text{ W}$$

Kompresijsko razmerje je razmerje med prostornino motorja, ko je delovni bat v najnižji legi, in prostornino motorja, ko je delovni bat v najvišji legi. Gre za razmerje med največjo in najmanjšo možno prostornino v motorju med obratovanjem.

$$\varepsilon = \frac{\text{Maximalen volumen}}{\text{Minimalen volumen}} = \frac{1736 \text{ cm}^3}{1160 \text{ cm}^3} = 1,49$$

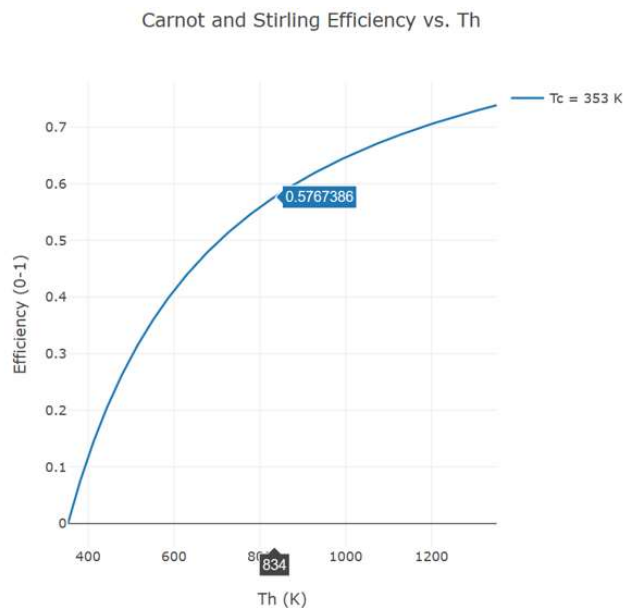
Po vnosu vseh zahtevanih podatkov v aplikacijo dobim moč motorja 1821 W pri 96,7 vrtljajih na sekundo.

Opravljen teoretično delo je prikazano na grafu (slika 39) in predstavlja površino znotraj točk 1, 2, 3, 4.



Slika 39: P-V diagram izdelanega motorja

Iz grafa izkoristka na sliki 40 je razvidno, da pri temperaturah vročega dela motorja 560 °C (833 K) in hladnega dela 80 °C znaša teoretični izkoristek motorja 57,6 %.



Slika 40: Teoretični izkoristek izdelanega motorja

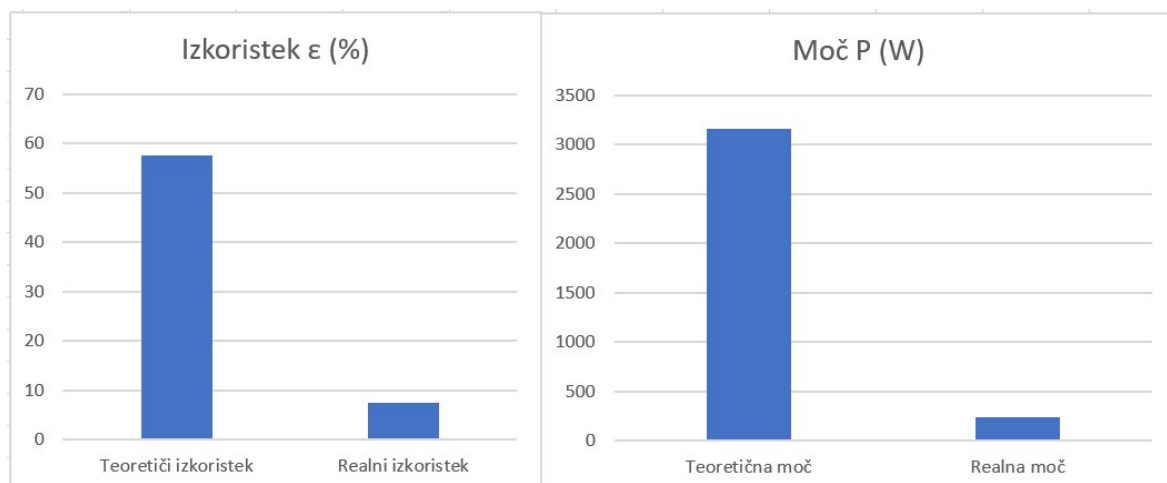
#### 4.2.10 Realna moč in izkoristek motorja

Realni navor in frekvenco vrtenja gredi sem realno meril na motorju. Moč in izkoristek sta karakteristiki, ki sem ju lahko določil na osnovi meritev. Izdelava motorja je potekala predvsem na eksperimentalni metodi, kar pomeni, da so sestavni deli motorja cenovno in kvalitativno na precej nizki ravni. Temu primerno sem pričakoval, da se bosta realna moč motorja in izkoristek le težko približala teoretičnim vrednostim iz prejšnjega poglavja.

Moč motorja je relativno enostavno izraziti na osnovi izmerjenega navora in vrtilne hitrosti motorja. Največji izmerjen navor na gredi motorja je znašal 19 Nm in frekvenci dveh vrtljajev na sekundo. Po izvedbi tega produkta dobim realno moč motorja, ki znaša ca. 240 W.

Realni izkoristek motorja je tisti podatek, ki opiše realno pretvorbo goriva v mehansko delo. Dobimo ga na osnovi razmerja realne moči, ki smo jo dobili na glavni gredi motorja (240 W) in dovedene moči goriva motorju (3160 W). Ko izvedemo računsko operacijo, ugotovimo, da znaša realni izkoristek izdelanega Stirlingovega motorja 7,5 %.

Na spodnjem grafu je razmerje med teoretičnimi in praktičnimi vrednostmi izkoristka in močjo motorja še grafično prikazano.



Slika 41: Primerjava teoretičnih in realnih karakteristik izdelanega motorja

#### 4.2.11 Lociranje in opis izgub motorja

Na sliki 42 je lociranih pet točk, kjer prihaja do glavnih izgub in so glavni razlog za tako nizek izkoristek motorja.

##### 4.2.11.1 Točka 1 (segrevanje valja)

Zgorevanje plina (butana) je bilo izvedeno preprosto z ročnim gorilnikom, kot je prikazano na spodnji sliki. S slike je razvidno, da je le del toplote prišel v stik z valjem motorja (vročim valjem), tako da je nastala direktna izguba uhajanja toplote v ozračje. Do direktne izgube ne bi prišlo v primeru zgorevanja goriva v kakovostnem gorilniku, ki omogoča maksimalni prenos toplote v vroči valj (izvedeno preko kakovostnega prenosnika toplote).

##### 4.2.11.2 Točka 2 (izgube pri pretoku delovnega plina)

Krmilni bat krmili prehod delovnega medija iz vročega v hladni del motorja. Kot je že omenjeno v teoretičnem delu te naloge, se Stirlingov krožni proces odvija v zaprtem sistemu. S termodinamičnega vidika prihaja do posameznih preobrazb plina in pri tem ni zaželeno, da prihaja do izgub med posameznimi fazami procesa. V vročem delu motorja mora delovni medij prevzeti čim več toplote in jo v hladnem delu čim več dodati. Da med temi prihodi ne prihaja do izgub, je tehnična rešitev ustrezna izolacijska zaščita. Tega pri izdelavi motorja nisem predvidel in je eden ključnih elementov za izboljšanje izkoristka motorja.

##### 4.2.11.3 Točka 3 (regeneracija)

Regeneracijo plina pri prihodu iz vročega v delovni valj opišemo na način, da pri prehodu skozi regeneratorski delovni medij v vročem stanju oddaja del toplote, nato pa jo v povratnem toku iz delovnega valja ponovno prevzame. Za regeneratorski delovni medij je zelo pomembno, da pri



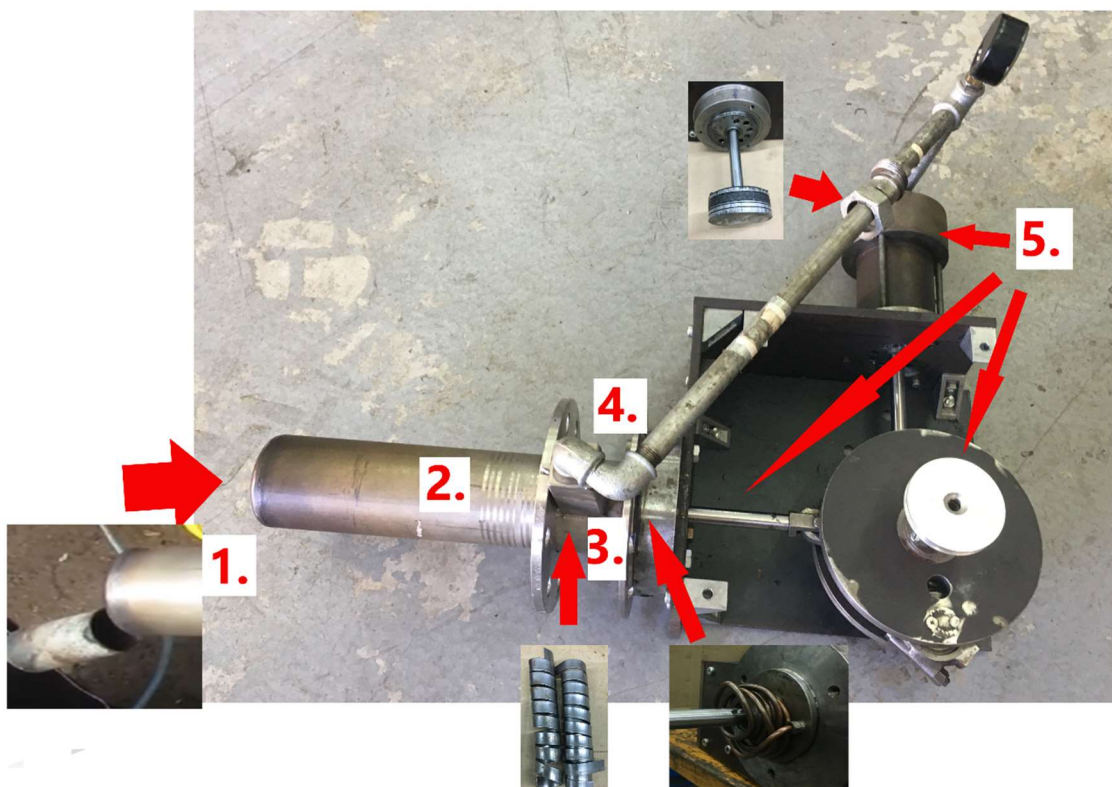
prehodu delovnega medija ne ovira in prevzema čim več toplote. Kot regeneratorski element sem uporabil kovinsko spiralo, ki delovnega medija (zraka) pri prehodu ni pretirano ovirala, prevzem in oddajanje toplote pa sta bila preskromna.

#### 4.2.11.4 Točka 4 (hlajenje)

V hladnem delu motorja je potrebno delovni medij čim bolje ohladiti v čim krajšem času. Hladilno napravo sem izvedel na način zvija bakrene cevi v spiralo, dolžine en meter in debeline pet milimetrov. Hladilna tekočina, ki je potekala skozi hladilno napravo, je privzela premalo toplote. Temperaturna razlika vhoda in izhoda hladilne tekočine je znašala le 4 °C.

#### 4.2.11.5 Točka 5 (trenje)

Stirlingov motor konstrukcijsko ni zahteven, ima pa kar nekaj gibajočih se delov. Ti gibajoči deli so na različne načine vpeti, vodeni in vležajeni. Poleg ležajnih delov je potrebno v predelu batnic in delovnega valja zagotoviti tudi tesnjenje, kar je brezpogojno povezano s trenjem in izgubami.



Slika 42: Točke izgub na motorju

#### **4.2.12 Stroški izdelave motorja**

Ceno motorja oziroma strošek izdelave motorja sem izračunal na osnovi evidentiranja stroškov v času izdelave motorja. Tako je nastal stroškovnik, ki ga podajam v spodnji tabelarni obliki (tabela 3).

V tabeli je opisan posamezni uporabljen material, njegova namembnost in opis, v katerem delu motorja je uporabljen.

Tabela 3: Stroškovnik izdelave poskusnega motorja

Št.	Material/storitev	Cena (EUR)
1	Pločevina 5 mm (za ohišje)	9
2	Pločevina 12 mm (za ohišje)	15
3	Pločevina 16 mm (vztrajnik, prirobnice valjev)	15
4	Cev $\phi 88$ mm, dolžina 450 mm (vroči valj)	10
5	Pokrov cevi (vroči valj)	4
6	Povezovalna cev, elementi (vodovodni material)	16
7	Valjna puša s batom (nova je 45 eur)	0
8	Glavni ležaj z ohišjem 2x	48
9	Kroglična vodilna puša 2x	28
10	Ležaji ojnični 4x	9
10	Vodilna gred dolžine 1 m (batnice)	32
11	Bakrena cev $\phi 5$ mm, dolžina 1 m (hladilnik)	16
12	Grafitna vrvica (tesnjenje delovnega valja)	7
13	Ojnice (nova 26 eur)	0
14	Manometer	4
15	Povezovalni pritrditveni elementi, vijaki	10
16	Varjenje posamičnih sklopov	40
17	Strojegradnja, sestavljanje motorja	250
	Skupaj	513

Strošek izdelave Stirlingovega motorja je torej znašal 513 evrov.

#### **4.2.13 Vrednotenje cene motorja**

Za podrobnejše vrednotenje stroška moramo ceno motorja izraziti v odvisnosti moči, ki jo proizvede motor. Motor je proizvedel 240 W moči. Tako znaša razmerje cene motorja in proizvedene moči 2,13 eur/W. Ta podatek se izboljša v primeru izdelave motorja z boljšim skupnim izkoristkom. Če vzamemo teoretični podatek moči motorja, je to razmerje 0,28 eur/W.

Za primerjavo lahko vzamemo primer povprečnega motorja z notranjim zgorevanjem, ki stane po spletno dostopnih podatkih (BMW, 2019) ca. 6500 eur z močjo 90 kW. Če izrazimo ceno motorja z močjo po enaki metodologiji kot v prejšnjem odstavku, dobimo 0,07 eur/W.

Iz tega podatka lahko ugotovimo, da je cena Stirlingovega motorja višja v primerjavi z motorjem z notranjim zgorevanjem. Je pa to samo kazalnik, ki na daljše časovno obratovanje SPTE-sistema ne bi smel vplivati na uporabo ali neuporabo Stirlingovega motorja v SPTE-sistemih; Stirlingov motor namreč zahteva zelo malo vzdrževanja. To bi lahko na daljši rok obratovanja izničilo razliko do investicijskega stroška.

## **5 Vgradnja motorja v kurilno napravo**

Izdelan motor sem želel vgraditi v kurilno napravo in ga preizkusiti. Ob iskanju kurilne naprave se mi je ponudila odlična priložnost za sodelovanje s podjetjem Valtis, d. o. o., iz Maribora. Omenjeno podjetje že 28 let deluje na področju razvoja in proizvodnje sodobnih ogrevalnih sistemov na biomaso.

Glede na okoljski vidik, ki sem ga v nalogi želel posebej poudariti, se zdi vgradnja motorja v kurilno napravo, ki deluje na biomaso, najprimernejša.

Vgradnjo motorja smo izpeljali v laboratoriju podjetja Valtis, d. o. o, kjer izvajajo tehnične meritve zgorevanja in dimnih plinov. Za izvedbo vgradnje je bilo potrebno najprej ustrezno pripraviti kurilno napravo. V kurilno napravo smo naredili odprtino, kamor je po vgradnji segal vroči valj motorja. Odprtina se nahaja na delu peči, kjer je v zgorevalni komori temperatura približno 600 °C. Odprtina se je opremila s posebno prirobnico, ki je omogočala pritrditev motorja v peč.



Slika 43: Pritrditev motorja v kurilno napravo

## 5.1 Določitev kurilne naprave za namestitev Stirlingovega motorja

V podjetju Valtis, d. o. o., proizvajajo hišne kurilne naprave moči razpona od 7 do 35 kW. Kot gorivo te kurilne naprave uporabljajo različno biomaso (sekanci, peleti, polena). Na osnovi tipskih proizvedenih kurilnih naprav smo se odločili, da bomo Stirlingov motor namestili v kurilno napravo, ki kot gorivo uporablja pelete, moč te naprave pa znaša 25 kW.

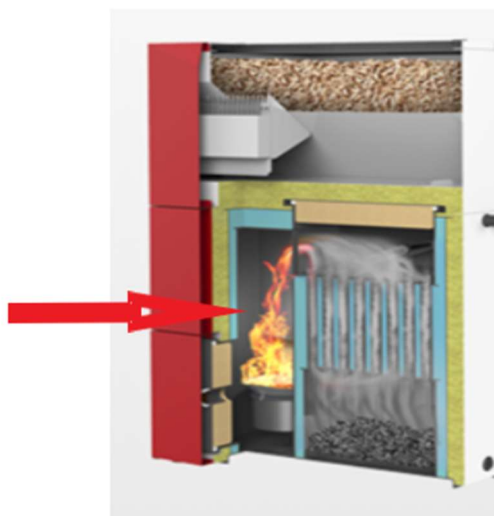
## 5.2 Določitev mesta namestitve Stirlingovega motorja

Sestava izbrane kurilne naprave je sledeča:

- gorilnik,
- prenosnik toplote, kjer prihaja do prenosa toplote na ogrevalno vodo za ogrevanje določenega objekta,
- zunanji okvir, ki je lahko v dvoplastni izvedbi z vodo in služi kot prenosnik toplote,
- ohišje kurilne naprave z izolacijo.

Temperatura dimnih plinov za gorilnikom znaša okrog 1000 °C. Temperatura dimnih plinov pri poti skozi prenosnik toplote pada in je najnižja pri izhodu v dimnik. Lokacijo postavitve Stirlingovega motorja smo določili v območju, kjer je temperatura dimnih plinov od 600 do 700 °C (slika 44). Temperaturo dimnih plinov smo izmerili s pomočjo laserskega merilnika temperature.

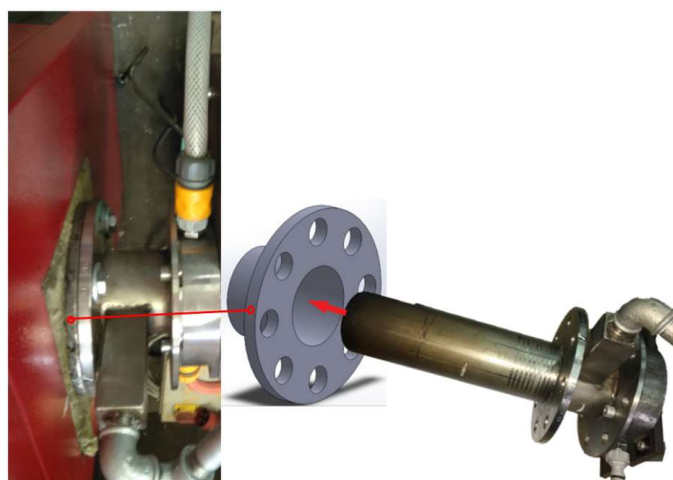
Mesto  
vgraditve  
motorja



Slika 44. Ponazoritev točke namestitve motorja v kurilno napravo

### 5.3 Vgradnja Stirlingovega motorja v kurilno napravo

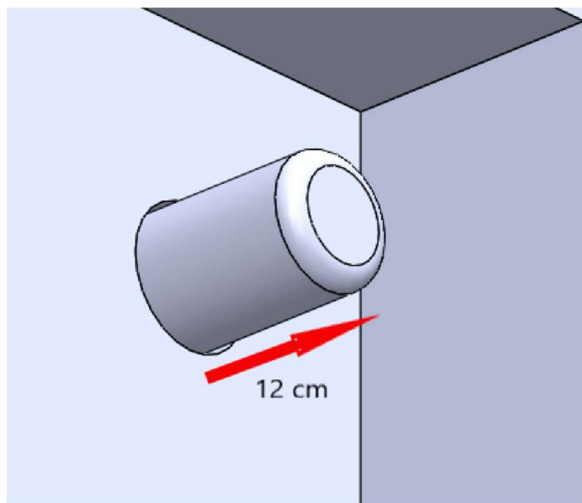
Po določitvi kurilne naprave je bilo potrebno namestiti prirobnico, kamor se je pritrdil motor (slika 45).



Slika 45: Shematski prikaz vgradnje motorja v kurilno napravo

Premer odprtine namestitve, ki je segala v notranjost kurilne naprave, je bila 3 milimetre večja od premera vročega bata motorja. To predstavlja relativno tesno vgradnjo motorja in dovolj veliko toleranco, ki je za tako vgradnjo potrebna zaradi temperaturnih raztezkov. Vgradna odprtina je segala v napravo skozi izolacijski del in skozi zunanjo plast z vodo v

skupni dolžini 9 centimetrov. Dolžina vročega valja motorja, ki je segal v notranjost naprave, je tako znašala 12 centimetrov.



Slika 46: Shematski prikaz seganja motorja v kurilno napravo

## 5.4 Delovanje motorja po vgradnji

Po vgradnji motorja v kurilno napravo se je pričakovalo, da bodo osnovne karakteristike motorja približno takšne, kot so bile ob poskusnem zagonu, vendar je že osnovna meritev navora pokazala nižjo vrednost (ca. 10 Nm). Pokazalo pa se je, da se zaradi prenosa toplote preko pritrditvene prirobnice segreva prevelika površina vročega valja. To posledično pomeni, da se ni ustvarila primerna temperaturna razlika za optimalno delovanje motorja. Pri testnem zagonu smo segrevali samo konico valja in je motor zadovoljivo obratoval. Pri vgradnji v kurilno napravo pa se je segrevala celotna polovica vročega valja, kar je povzročilo prevelik prehod toplote tudi v hladni del motorja.

Razlog za prehod toplote (preko vročega valja) je v tem, da je celoten vroči del motorja do hladilnika narejen iz enega dela. To povzroča enostaven prehod toplote od kurilne naprave preko vročega valja v hladilni del motorja, kar pa direktno vpliva na izkoristek motorja.

## 5.5 Rezultat vgradnje

Meritve vrtilnega navora so pokazale nižje vrednosti od pričakovanih, nadaljnje meritve zato niso bile izvedene. Osredotočili smo se na iskanje razlogov za izmerjene nižje vrednosti. Slednji so predstavljeni v prejšnjem poglavju. Vgradnja tega motorja v kurilno napravo je pokazala, da implementacija Stirlingovega motorja v kurilno napravo lahko oblikuje ustrezen energetski postroj, ki bi ga bilo smiselno nadgraditi, izboljšati in po možnosti uporabiti kot

idejo za novo poslovno priložnost. Takšen je bil tudi prvotni dogovor s podjetjem Valtis, d. o. o., ki je bilo pripravljeno sodelovati pri izvedbi te naloge.

Lastnik podjetja Valtis, d. o. o., je podal razvojno idejo, ki temelji na osnovi te naloge. Razvojna ideja je izdelava električne samooskrbne kurilne naprave. Sodobna klasična kurilna naprava namreč za delovanje podpornih naprav (krmiljenje kurilne naprave, ventilator za podpih ...) celotne kurilne naprave potrebuje električno oskrbo. Z razvojem električne samooskrbne kurilne naprave bi bilo zagotovljeno ogrevanje objektov, neodvisno od javne električne oskrbe.



Slika 47: V kurilno napravo vgrajen motor

## **6 Sklep**

Kogeneracija ali SPTE je energetsko varčen sistem z obilico prednosti in bi lahko z vidika podnebnih sprememb v prihodnje odigral ključno vlogo. Temu pritrjuje tudi globalna energetska politika, ki investitorje v tej smeri podpira z ustreznimi spodbudami.

Pri obravnavi SPTE-sistemov je bilo moč ugotoviti zelo raznoliko sestavo posameznih sistemov, ki so predvsem odvisni od vrste goriva, ki ga uporabljajo. Kar nekaj sistemov je še v fazi razvoja. Med njimi je tudi sistem, kjer se kot toplotni stroj uporablja Stirlingov motor. Stirlingov motor je teoretično relativno enostaven motor, v praksi pa v različnih panogah ni doživel množične uporabnosti. V tej povezavi sem v nalogi obravnaval in prikazal delovanje Stirlingovega motorja ter iskal možnosti uporabe motorja v SPTE-sistemih. Pri tem sem ugotavljal možnosti uporabe različnih vrst goriva s poudarkom na obnovljivih virih energije. Ker poteka pri Stirlingovem motorju zgorevanje izven motorja, ima v SPTE-sistemih z uporabo obnovljivih virov vrsto prednosti. Predvsem lahko govorimo o pripravi goriva na zgorevanje in kakovosti zgorevanja, ki posledično vpliva na emisije.

S teoretskega vidika delovanja Stirlingovega motorja so ključne težave v tem, da so materiali zelo izpostavljeni velikim temperaturnim obremenitvam. Glede na informacije o razvoju temperaturno visokoodpornih materialov v različnih razvojnih podjetjih (NASA), bi vgradnja teh materialov v motor Stirling odpravila te težave in dvignila uporabnost motorja v različnih panogah.

Implementacija Stirlingovega motorja v SPTE-sistem zahteva teoretično in praktično podlago. S teoretičnega vidika sem naredil s pomočjo literature pregled delovanja in sestave posamičnih kogeneracijskih sistemov in opravil pregled, sestavo, tipe in delovanje Stirlingovega motorja. Teoretične dispozicije Stirlingovega motorja mu dajejo zelo velike možnosti uporabe v sodobnih SPTE-sistemih.

Na tej točki se pojavlja vprašanje, zakaj je Stirlingovih motorjev v kogeneracijskih sistemih tako malo. V Sloveniji imamo le dva takšna postroja. Za iskanje tega odgovora sem k sodelovanju povabil strokovno javnost in na to temo opravil deset strokovnih srečanj s strokovnjaki, ki delujejo na področju SPTE-sistemov. Na ta način sem pridobil strokovna mnenja s področja energetike, strojegradnje in ekonomije. Analiza teh mnenj je pokazala, da so za neuporabo Stirlingovega motorja v SPTE-sistemih sledeči razlogi:

- visoka cena sistema predvsem na račun dragega Stirlingovega motorja (vzrok za visoke cene Stirlingovega motorja je opisan v poglavju 4.1.1.);
- tehnične omejitve pri delovanju Stirlingovega motorja v SPTE-sistemu (materiali še niso odporni na zahtevane temperaturne obremenitve delovanja motorja);
- razvoj sistema z vključitvijo Stirlingovega motorja ni bil zanimiv, ker je na trgu obstajal dostopnejši motor z notranjim zgorevanjem in je uporabljal fosilno gorivo, ki je bilo na trgu zelo dostopno in vprašanja vplivov na okolje ni bilo v ospredju.

Z vidika praktične implementacije sem izdelal manjši Stirlingov motor. Po izdelavi je sledila še montaža v kurilno napravo.



Izdelava motorja je potekala v strojegradni delavnici in je zajemala ves proces nastanka takega motorja. Ta proces je zajemal načrtovanje, nabavo materiala, izdelavo vseh delov motorja in sestavo motorja. Po sestavi je sledil testni preizkus in določitev splošnih karakteristik motorja. Na osnovi razmerja med teoretičnimi in realnimi karakteristikami sem opravi tudi analizo izkoristka izdelanega motorja. S pomočjo stroškovnika izdelave motorja sem opravil ekonomsko bilanco učinkovitosti izdelanega motorja. Ta je pokazala, da je bil strošek izdelave motorja 513 evrov, moč motorja pri testiranju je bila 240 W in izkoristek 7,5 %. Vgradnja motorja v kurilno napravo je bila izvedena v podjetju Valtis, d. o. o., v Mariboru. Na kurilni napravi je bilo potrebno za vgraditev motorja izdelati odprtino s prirobnico, kamor je bil motor nameščen in pritrjen. Toplotni pogoji v kurilni napravi so bili drugačni kot pri testnem zagonu, kar se je odražalo tudi v delovanju motorja.

V skladu z dispozicijo magistrske naloge v nadaljevanju predstavljam zastavljene hipoteze (predstavljene v poglavju 1.1) in njihove posamezne obravnave.

Izkoristek Stirlingovega motorja je odvisen od temperaturnih razlik v vročem in hladnem delu motorja. Večja temperaturna razlika pomeni večji izkoristek. K ugodnemu izkoristku motorja vpliva tudi podatek o kakovosti izvedbe regeneracije delovnega plina, ki ga določen motor uporablja. Teoretično gledano je izkoristek Stirlingovega procesa zelo blizu Carnotovem izkoristku.

Če pogledamo teoretični izkoristek mojega izdelanega motorja, ugotovimo, da bi pri temperaturah v vročem delu 560 °C in hladnem 80 °C izkoristek znašal 57 % (simulacija predstavljena v poglavju 4.2.9). To je zelo ugoden podatek, realni izkoristek izdelanega motorja je bil bistveno nižji. Razlog za izrazito odstopanje izkoristka izdelanega motorja so izgube, ki nastanejo v realnih pogojih delovanja motorja. Izkoristek motorja bi bil lahko bistveno boljši v primeru kakovostnejše izdelave motorja, uporabe kakovostnih prenosnikov toplote in uporabo ustrežnejših materialov.

Izkoristki Stirlingovih motorjev, ki so primerni za vgraditev v SPTE-sisteme, znašajo med 32 in 37 %, kar je višje od motorjev z notranjim zgorevanjem (FS Ljubljana, 2020).

Število SPTE-sistemov, ki v svojem postroju uporabljajo Stirlingov motor, je zelo malo. V Sloveniji obratujeta dva takšna postroja, v obeh primerih gre za uporabo Stirlingovih motorjev, ki po kataloških podatkih in v praksi obratujeta z zelo visokim skupnim izkoristkom.

Glede na predstavljen podatek o izkoristku Stirlingovega motorja, lahko hipotezo št. 1, ki se glasi "Stirlingov motor je energetsko zelo učinkovit in zato primeren za uporabo v kogeneracijskih (SPTE) sistemih", potrdim.

Sodelujoči strokovnjaki menijo, da so Stirlingovi motorji predragi in je to razlog za nizko uporabo teh motorjev v posameznih SPTE-postrojih. Glavni razlog za visoko ceno motorjev je v njihovi nizkoštevilčni proizvodnji in uporabi visokokakovostnih (temperaturno odpornih) materialov. V prihodnje lahko pričakujemo pocenitev motorjev na račun večje proizvodnje in ostalih prednosti, ki jih v luči podnebnih sprememb omogoča Stirlingov motor na področju uporabe goriv. Predvsem so to prednosti glede možnosti uporabe obnovljivih goriv.

Pri izdelavi motorja sem nakazal, da lahko uporaba določenih sestavnih elementov motorja, vzetih iz drugih sistemov (motorja z notranjim zgorevanjem), zniža strošek izdelave. Je pa takšen eksperimentalni način izdelave motorja nakazal stopnjo zahtevnosti izdelave Stirlingovega motorja in vpliv take izdelave na njegovo specifično delovanje. Z upoštevanjem strokovnih mnenj sodelujočih strokovnjakov in ugotovitev pri izdelavi motorja lahko hipotezo št. 2, ki se glasi "Izdelava Stirlingovega motorja je cenovno draga in s tem predstavlja neracionalno uporabo tega motorja v kogeneracijskih (SPT) sistemih", potrdim.

Stirlingov motor poznamo v treh izvedbah (alfa, beta in gama). Osnovne razlike so v postavitvi valjev, osnem zamiku ročičnega sistema in načinu pretoka delovnega medija med vročim in hladnim delom motorja. Pri spletnem pregledu posameznih proizvajalcev Stirlingovih motorjev (poglavje 3.3) sem ugotovil, da lahko vsak proizvajalec motorjev geometrijsko prilagaja sestavo motorja znotraj osnovnih teoretskih izvedb. Motor, ki sem ga izdelal, tako ne ustreza nobeni dobesedni definiciji posameznih izvedb. Natančneje ga lahko definiram za nek hibrid med izvedbama alfa in gama. Izdelava in uspešen preizkus takšne izvedbe motorja omogočata, da lahko hipotezo št. 3, ki se glasi "Stirlingov motor geometrijsko ne dopušča uporabe v kogeneracijskih sistemih", ovržem. Stirlingov motor je torej mogoče konstrukcijsko prilagoditi posameznim geometrijskim zahtevam določenega SPT-sistema in na ta način izvesti implementacijo.

Izdelava motorja v okviru te magistrske naloge je potrdila moje osnovno prepričanje, da je določeno teoretično vedenje potrebno ovrednotiti s pomočjo praktičnega eksperimenta. Izdelava motorja in uspešno testiranje sta me je spodbudila, da bom z raziskovanjem področja nadaljeval. Veseli me, da je področje uporabe Stirlingovega motorja postalo zanimivo tudi za podjetje, s katerim sem sodeloval v okviru te magistrske naloge, ki v implementaciji Stirlingovega motorja v svoj prodajni program vidi nadaljnji razvoj svoje panoge.

## **7 Povzetek**

Globalne podnebne razmere zahtevajo od energetskih sistemov visoko učinkovitost, možnost uporabe obnovljivih virov energije, emisijsko nadzorovano zgorevanje goriv ter decentralizirano proizvodnjo elektrike in toplote. Uporaba kogeneracije v energetiki je trenutno v porastu. V uporabi so različni klasični sistemi, toplotni stroj pretvarja energijo goriva v mehansko, s katero poganja generator. Kogeneracijskih sistemov, ki bi v postroju uporabljali Stirlingov motor, pa je zelo malo.

S teoretičnim in praktičnim eksperimentom izdelave Stirlingovega motorja in vgradnje v malo klasično hišno kurilno napravo sem prikazal možnost uporabe Stirlingovega motorja v kogeneracijskih sistemih. Konstrukcija izdelanega motorja temelji na predhodno obravnavanih teoretičnih tipih Stirlingovega motorja. Izdelan motor je eksperimentalna kombinacija osnovnih teoretičnih tipov Stirlingovega motorja.

Z vgradnjo je bil namen prikazati smernice uporabe Stirlingovega motorja v kogeneracijskih postrojih. Na osnovi izvedenega eksperimenta in pregleda statističnih podatkov o trenutno delujočih postrojih je bila ugotovljena relativna kompleksnost delovanja takega sistema. Uporaba sodobnih termodinamično odpornih materialov v komponentah Stirlingovega motorja bi omogočila večjo uporabnost teh motorjev v kogeneraciji in posledično tudi na drugih področjih.

## **8 Abstract**

Global climate conditions demand high efficiency energy systems, the possibility of using renewable energy sources, emission-controlled combustion of fuels and decentralised production of electricity and heat. The use of cogeneration in the energy sector is currently increasing. Various classic systems are being used; the heat engine converts the energy of the fuel into mechanical energy which drives the generator. However, there are very few cogeneration systems that use a Stirling engine in the system.

With a theoretical and practical experiment of constructing a Stirling engine and installing it in a small classic house heating device, I showed the possibility of using a Stirling engine in cogeneration systems. The construction of the manufactured engine is based on the previously discussed theoretical types of the Stirling engine. The manufactured engine is an experimental combination of the basic theoretical types of the Stirling engine.

The purpose of the installation was to show the guidelines for the use of the Stirling engine in cogeneration systems. Based on the performed experiment and the review of statistical data on currently operating systems, the relative complexity of the operation of such a system was determined. The use of modern thermodynamically resistant materials in the components of a Stirling engine would enable greater applicability of these engines in cogeneration and consequently in other areas as well.

## 9 Viri

- Abuelyamen, A., & Ben, R. (2018). Energy efficiency comparison of Stirling engine types ( $\alpha$ ,  $\beta$ , and  $\gamma$ ) using detailed CFD modeling. *International Journal of Thermal Sciences*, 411-423.
- Agencija za energijo. (2016). *Poročilo o doseganju nacionalnih ciljev na področju SPTE za obdobje 2015-2016*. Maribor: AGEN.
- Agencija za energijo. (14. 8 2019). *Obnovljivi viri energije (OVE) in sproizvodnja (SPTE)*. Pridobljeno iz Obnovljivi viri energije (OVE) in sproizvodnja (SPTE): <https://www.agen-rs.si/izvajalci/ove-ure/obnovljivi-viri-in-sproizvodnja/register-deklaracij-za-proizvodne-naprave>
- Al-Mansour, D. F. (10. 10 2019). *Proizvodnja toplote in električne energije iz kmetijskih rastlinskih ostankov*. Pridobljeno iz Proizvodnja toplote in električne energije iz kmetijskih rastlinskih ostankov: [https://arhiv.kis.si/datoteke/File/kis/SLO/MEH/Biomasa/Energija\\_iz\\_Kmetijskhi\\_rastlinskih\\_ostankov-IJS-CEU.pdf](https://arhiv.kis.si/datoteke/File/kis/SLO/MEH/Biomasa/Energija_iz_Kmetijskhi_rastlinskih_ostankov-IJS-CEU.pdf)
- ARSO. (1. 11 2019). *Energija sončnega obsevanja*. Pridobljeno iz Energija sončnega obsevanja: [http://www.arso.gov.si/vreme/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/Zgibanka-trajanje\\_soncnega\\_obsevanja.pdf](http://www.arso.gov.si/vreme/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/Zgibanka-trajanje_soncnega_obsevanja.pdf)
- BHKW-Prinz. (5. 10 2019). *Pellet-BHKW mit Stirlingmotor*. Pridobljeno iz Pellet-BHKW mit Stirlingmotor: <http://www.bhkw-prinz.de/sunmachine-pellet-bhkw-mit-stirlingmotor/141>
- Bianca Angotti. (26. 10 2019). *Laboratorij za dinamično pretvorbo toplotne energije*. Pridobljeno iz Laboratorij za dinamično pretvorbo toplotne energije: [https://sites.ualberta.ca/~dnobes/research\\_1.html](https://sites.ualberta.ca/~dnobes/research_1.html)
- Biomasa, d. o. o. (20. 10 2019). *Biomasa*. Pridobljeno iz Biomasa: <http://www.biomasa.si/o-lesni-biomasi>
- BMW. (3. 11 2019). *BMW parts catalog*. Pridobljeno iz BMW parts catalog: <http://bmwfans.info/parts-catalog>
- Borzen, d. o. o. (9. 9 2019). *Trajnostna energija*. Pridobljeno iz Trajnostna energija: <http://www.trajnostnaenergija.si/Trajnostna-energija/Proizvajajte/Sproizvodnja-toplote-in-elektri%C4%8Dne-energije-SPTE>
- Buden, T. (2014). *Uporaba stirlingovega motorja v kogeneracijske namene*. Maribor: Fakulteta za energetiko, Univerza v Mariboru.

- Daily, H. (16. 1 2020). *Hemmings Daily*. Pridobljeno iz GM : <https://www.hemmings.com/blog/2013/12/22/sia-flashback-calvair-gms-stirling-effort/>
- Dervis Erol, H. Y. (17. 1 2017). A review development of rhombic drive mechanism used in the Stirling engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1044-1067. Pridobljeno iz [https://www.researchgate.net/figure/Philips-Type-in-line-4-235-Stirling-engine-58\\_fig25\\_316937935](https://www.researchgate.net/figure/Philips-Type-in-line-4-235-Stirling-engine-58_fig25_316937935)
- dr. Novak, P. (2012). *Priložnosti decentraliziranih SPTE sistemov in Stirling kogeneracijski motorji*. Ljubljana: Energotech.
- Ekogrupa. (30. 10 2019). *Kogeneracija*. Pridobljeno iz kogeneracija: <https://www.ekogrupa.si/9/kogeneracije-in-trigeneracije>
- Fakulteta za strojništvo Ljubljana. (2. 10 2010). *Tehnologije neodvisne proizvodnje električne energije malih moči*. Pridobljeno iz Tehnologije neodvisne proizvodnje električne energije malih moči: <http://www.ee.fs.uni-lj.si/diploma1/index3.htm>
- FS Ljubljana. (20. 3 2020). *Karakteristike Stirlingovega motorja*. Pridobljeno iz FS Ljubljana: [http://lab.fs.uni-lj.si/kes/energetski\\_stroji\\_in\\_naprave/Vaja\\_08\\_StirlingovMotor.pdf](http://lab.fs.uni-lj.si/kes/energetski_stroji_in_naprave/Vaja_08_StirlingovMotor.pdf)
- Golega. (2. 10 2019). *Golega e- gradiva*. Pridobljeno iz Golega e- gradiva: [https://e-gradiva.golea.si/e-gradiva/OVE\\_T10P02\\_gorivne\\_celice/index.html](https://e-gradiva.golea.si/e-gradiva/OVE_T10P02_gorivne_celice/index.html)
- Hot Air engens*. (3. Febuar 2019). Pridobljeno iz Hot Air engens: <http://hotairengines.org/stirling-engines-inventors/stirling>
- Košmrlj, J. (2009). *Emisije pri kurjenju biomase*. Ljubljana: Biotehnična fakulteta UM Ljubljana.
- Kraut, B. (1994). *Krautov strojniški priročnik*. Tehniška založba Slovenije: Ljubljana.
- Kuhn, V., Jiří, K., & Bulatov, I. (2008). MicroCHP: Overview of selected technologies, products and field test results. *Applied Thermal Engineering*, 2039-2048.
- Lawson, B. (12. 9 2010). *The Electropaedia*. Pridobljeno iz The Electropaedia: <https://www.mpoweruk.com/about.htm>
- M. Mori, M. S. (2010). *Karakteristike stirlingovega motorja*. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo.
- Mide Technology USA. (5. 9 2019). *Ideal Stirling Cycle Calculator*. Pridobljeno iz Ideal Stirling Cycle Calculator: <https://www.mide.com/ideal-stirling-cycle-calculator>
- Ministrstvo za infrastrukturo. (10. 1 2019). *Portal Energetika*. Pridobljeno iz Portal Energetika: <https://www.energetika-portal.si/statistika/>

- Nagaraja, d. M. (10. 1 2019). *Nasa Science*. Pridobljeno iz Nasa Science: <https://science.nasa.gov/researchers>
- Nakahara, H. (9. 18 2019). *The Stirling engine*. Pridobljeno iz The Stirling engine: <https://people.ok.ubc.ca/jbobowsk/Stirling/how.html>
- Omega Air. (1. 10 2019). *Kogeneracija*. Pridobljeno iz Kogeneracija: <https://www.omega-air.si/si/prodajni-program/kogeneracija>
- Our Company, inc. (18. 2 2020). *Fotovoltaika*. Pridobljeno iz Fotovoltaika: <http://fotovoltaika-on.net/solarne-celice/kako-delimo-solarne-celice.html>
- Qakir, U. (2012). The role of cogeneration systems in sustainability of energy. *Energy Conversion and Management*, 196–202.
- Rihard, F. (2014). *Motorno vozilo*. (A. Sašo, Prev.) Ljubljana: Tehniška založba Slovenije.
- Senegačnik, A. (2005). *Osnovne značilnosti goriv*. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo.
- Solarstirlingplant. (3. 9 2019). *Solar power for home*. Pridobljeno iz Solar power for home: <https://www.pinterest.com/pin/601160250238100913/?lp=true>
- Swedish Stirling AB. (1. 2 2019). *Swedish Stirling AB*. Pridobljeno iz Swedish Stirling AB: <https://swedishstirling.com/en/about-ripasso-energy/>
- Thombare, D. (2008). *Rajarambapu Institute Of Technology*, 1-16.
- Thombare, D. (10. 1 2008). Technological development in the Stirling cycle engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6-35. Pridobljeno iz file:///C:/Users/infok/Downloads/TechnologicalDevelopmentinStirlingCycleEngine-D.G.Thombare%20(2).pdf
- Tie, L., DaWei, T., Li, Z., Jinglong, D., Tian, Z., & Yu, J. (2012). Development and test of a Stirling engine driven by waste gases for the micro-CHP system. *Applied Thermal Engineering*, 119 -124.
- Uroš, S., Zupan, G., & Butala, V. (2017). Parametrična analiza Stirlingove soproizvodne enote na biomaso za uporabo v hišni tehniki. *Strojniški vesnik*, 1-10.
- Waltis, d. o. o. (30. 10 2019). *Katalogi Waltis*. Pridobljeno iz Katalogi Waltis: <https://www.ogrevanje-kotli.si/kotli>
- Wikipedia. (10. 9 2019). *Wikipedia*. Pridobljeno iz Wikipedia: <https://sl.wikipedia.org/wiki/Inovacija>
- Wikipedija - Termodinamika. (6. 11 2019). *Carnotov izrek*. Pridobljeno iz Carnotov izrek: [https://sl.wikipedia.org/wiki/Carnotov\\_izrek\\_\(termodinamika\)](https://sl.wikipedia.org/wiki/Carnotov_izrek_(termodinamika))

Woodbank Communications Ltd,. (1. 2 2005). *Queens Park - Elektropedia*. Pridobljeno iz Queens Park - Elektropedia: [www.mpoweruk.com](http://www.mpoweruk.com)



## **Priloga št.1**

### **Zapisnik o intervjuju**

**Podjetje:**

-----  
-----  
-----

**1. Vaše strokovno mnenje o možnostih vgradnje Stirlingovega motorja v kogeneracijske sisteme?**

-----  
-----  
-----  
-----  
-----  
-----  
-----  
-----  
-----  
-----

**Intervju opravil: Boštjan Knez**