

# Razvojni pravci nisko temperaturnog Stirling stroja u svijetu

---

**Bošnjak, Antun**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:323173>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-04-19**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Preddiplomski studij naftnog rudarstva

**RAZVOJNI PRAVCI NISKO TEMPERATURNOG STIRLING STROJA U SVIJETU**

Završni rad

Antun Bošnjak

N 4213

Zagreb, 2020.

## RAZVOJNI PRAVCI NISKO TEMPERATURNOG STIRLING STROJA U SVIJETU

ANTUN BOŠNJAK

Završni rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku  
Pierottijeva 4, 10000 Zagreb

### Sažetak

Nisko temperaturni Stirling stroj razvija se na mnogim sveučilištima u svijetu, a po prvi puta je pokrenut na RGN fakultetu još 1983. godine. Tada je radio pri temperaturnoj razlici između dovedene i odvedene topline od svega 20°C. Njegov suvremeni razvoj temelji se prvenstveno na ekološkoj prednosti koju Stirling strojevi imaju u odnosu na motore s unutarnjim izgaranjem, jer pri radu nemaju štetnih proizvoda izgaranja niti ostalih onečišćenja zraka i okoliša. Dovođenje toplinske energije kod Stirling strojeva omogućuje diverzifikaciju energenata, jer može biti ostvareno iz svih vrsta goriva pa tako i iz fosilnih, iako su značajni upravo po mogućnostima primjene obnovljivih izvora energije. Posebno su pogodni za korištenje na geotermalnim ležištima nižih i srednjih temperatura geotermalne vode, a ovaj se prototip najviše razvija u Japanu. Ostvarene su i mnoge uporabe Stirling stroja putem sunčeve energije, od kojih je pri razvoju nisko temperaturnog modela najznačajnije dostignuće Sveučilištu u Dresdenu. U radu su u kratko prikazani i ostali doprinosi u optimizaciji parametara Stirlingovog termodinamičkog procesa, od kojih se posebno ističu rezultati istraživanja kompresijskog omjera, ostvareni prošle godine u Kanadi.

Ključne riječi: Stirling stroj, obnovljivi izvori energije, energetska učinkovitost

Završni rad sadrži: 28 stranica, 1 tablicu, 10 slika i 16 referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Završni rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta  
Pierottijeva 6, Zagreb.

Mentor: Dr. sc. Sonja Koščak Kolin, docentica RGN fakulteta

Ocjenjivači: Dr. sc. Sonja Koščak Kolin, docentica RGN fakulteta  
Dr. sc. Luka Perković, docent RGN fakulteta

Dr. sc. Tomislav Kurevija, izvanredni profesor RGN fakulteta

Datum obrane: 10. srpnja 2020., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

## SADRŽAJ

|                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| POPIS SLIKA.....                                                            | I   |
| POPIS TABLICA .....                                                         | II  |
| POPIS OZNAKA I KORIŠTENIH JEDINICA .....                                    | III |
| 1. UVOD .....                                                               | 1   |
| 2. OSNOVE RADA STIRLING STROJA .....                                        | 3   |
| 3. NOVE IZVEDBE STIRLING STROJEVA.....                                      | 5   |
| 3.1. Prvi nisko temperaturni Stirling stroj.....                            | 5   |
| 3.1.1. Proračun snage nisko temperaturnog Stirling stroja.....              | 11  |
| 3.2. Suvremeni razvoj nisko temperaturnih Stirling strojeva u svijetu ..... | 17  |
| 3.2.1. Kanada.....                                                          | 21  |
| 3.2.2. Tajvan.....                                                          | 22  |
| 3.2.3. Njemačka.....                                                        | 23  |
| 4. ZAKLJUČAK.....                                                           | 26  |
| 5. LITERATURA .....                                                         | 27  |

## POPIS SLIKA

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Slika 3-1.</b> Stirling-Kolinov stroj i dimenzije cilindra.....                       | 11 |
| <b>Slika 3-2.</b> Indikatorski p,v-dijagram idealnog Stirling procesa.....               | 12 |
| <b>Slika 3-3.</b> Realni indikatorski dijagram.....                                      | 15 |
| <b>Slika 3-4.</b> Modularna konstrukcija Stirling strojeva povezanih u seriju.....       | 16 |
| <b>Slika 3-5.</b> Stirling stroj snage 10 kW, Ordos, China, Cleanergy Stirling C10S..... | 18 |
| <b>Slika 3-6.</b> Senftov nisko temperaturni Stirling stroj .....                        | 19 |
| <b>Slika 3-7.</b> Nisko temperaturni model snage 250 W, Japan .....                      | 20 |
| <b>Slika 3-8.</b> Stirling model Mark 1 .....                                            | 22 |
| <b>Slika 3-9.</b> Stirling stroj na matičnoj ploči .....                                 | 23 |
| <b>Slika 3-10.</b> Solarni nisko temperaturni Stirling stroj SUNWATER® .....             | 25 |

## POPIS TABLICA

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablica 3-1.</b> Ulazni parametri za proračun snage Stirling stroja..... | 12 |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|

## POPIS OZNAKA I KORIŠTENIH JEDINICA

| Simbol             | Opis simbola                                        | Mjerna jedinica |
|--------------------|-----------------------------------------------------|-----------------|
| a                  | Duljina stranice kutije                             | m               |
| $c_v$              | Specifični toplinski kapacitet vode                 | J/kg*K          |
| C                  | Konstanta proporcionalnosti                         | -               |
| $f_s$              | Schmidtov faktor                                    | -               |
| $\ln(\varepsilon)$ | Prirodni logaritam kompresijskog omjera             | -               |
| M                  | Masa radnog fluida                                  | kg              |
| n                  | Broj okretaja                                       | okr/min         |
| p                  | Tlak                                                | Pa              |
| P                  | Inducirana snaga                                    | W               |
| $p_{atm}$          | Atmosferski tlak                                    | Pa              |
| $q_d$              | Dovedena specifična toplina                         | J/kg            |
| $q_o$              | Odvedena specifična toplina                         | J/kg            |
| $q_{1,2}$          | Specifična toplina izotermne kompresije             | J/kg            |
| $q_{2,3}$          | Specifična toplina izohornog grijanja radnog fluida | J/kg            |
| $q_{3,4}$          | Specifična toplina izotermne ekspanzije             | J/kg            |
| $q_{4,1}$          | Specifična toplina izohornog hlađenja radnog fluida | J/kg            |
| R                  | Plinska konstanta                                   | J/mol*K         |
| $T_{atm}$          | Atmosferska temperatura                             | K               |
| $T_c$              | Hladna temperatura                                  | K               |
| $T_h$              | Vruća temperatura                                   | K               |
| $T_{max}$          | Najveća temperatura                                 | K               |
| $T_{min}$          | Najmanja temperatura                                | K               |
| $T_{1,2}$          | Najmanja temperatura                                | K               |
| $T_{3,4}$          | Najveća temperatura                                 | K               |

|                  |                                                    |       |
|------------------|----------------------------------------------------|-------|
| $V$              | Volumen                                            | $m^3$ |
| $V_c$            | Hladni volumen                                     | $m^3$ |
| $V_d$            | Volumen displacera                                 | $m^3$ |
| $V_h$            | Vrući volumen                                      | $m^3$ |
| $V_k$            | Volumen kutije                                     | $m^3$ |
| $V_{max}$        | Najveći volumen                                    | $m^3$ |
| $V_{min}$        | Najmanji volumen                                   | $m^3$ |
| $V_o$            | 'Mrtvi volumen'                                    | $m^3$ |
| $V_{uk}$         | Ukupni volumen                                     | $m^3$ |
| $w$              | Specifični rad                                     | J/kg  |
| $\Delta s$       | Razlika entropije                                  | J/K   |
| $\Delta s_{1,2}$ | Razlika entropije na početku i na kraju kompresije | J/K   |
| $\Delta s_{3,4}$ | Razlika entropije na početku i na kraju ekspanzije | J/K   |
| $\Delta T$       | Razlika temperature                                | K     |
| $\Delta T_{2,3}$ | Razlika temperature                                | K     |
| $\Delta T_{4,1}$ | Razlika temperature                                | K     |
| $\Delta V$       | 'Stroke' volumen                                   | $m^3$ |
| $\varepsilon$    | Kompresijski omjer                                 | -     |
| $\eta_c$         | Carnotov stupanj djelovanja                        | -     |
| $\eta_s$         | Stirlingov stupanj djelovanja                      | -     |



## 1. UVOD

Današnji čovjek okružen je raznim strojevima, koji su nastajali kroz povijest. Tako su braća Robert i James Stirling još 1815. godine patentirali Stirling stroj, a original je sačuvan na Sveučilištu u Edinburgu u Škotskoj. Prema mnogim navodima, izumitelj je zapravo bio James, dok je Robert Stirling bio uključen jedino u dokumentaciji prijave patenta. S obzirom da je James bio inženjer, teoretski je objasnio i razvio sve tehničke detalje te zaslužuje priznanje kao izumitelj Stirling stroja. Prema Kolin (1991), u vrijeme izuma, Stirling stroj je popularno zvan strojem na vrući zrak te je i tada predstavljao alternativu parnom stroju, koji se koristio kao osnovni pokretač industrije. Prema [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org) (2020), Stirling stroj prvi je put upotrijebljen u kamenolomu Ayrshire (Škotska), za potrebe dobave vode.

Sam motor imao je malu snagu, ali je imao svoje ekološke prednosti i znatnu uštedu u potrošnji ugljena kao energenta. No, ipak nije mogao konkurirati parnim strojevima. U svojim prvim godinama, prema [www.britannica.com](http://www.britannica.com) (2020), koristio se na mjestima gdje nije bilo potrebe za velikom snagom, kao što su primjerice primjene za opskrbu vodom, pokretanje jednostavnih vjetrenjača, tiskara, svjetla na svjetionicima, miksera i malih crpki u kemijskim tvornicama, osiguravanje dovoljne količine zraka u crkvenim orguljama te za mnoge druge svrhe. Nadalje prema Kolin (1991), 1845. godine Stirling motor je pokretao cijelo postrojenje u pomorskoj tvornici Dundee Foundry Company. Nešto kasnije, početkom 20. stoljeća Stirling motori nisu doživjeli komercijalni uspjeh kada su električni motori i motori sa unutarnjim izgaranjem preuzeli ulogu pogonskih motora.

Uoči Drugog svjetskog rata, nizozemska tvrtka Philips odabire Stirling motor kao pogonski motor za radio uređaje na mjestima gdje nema opskrbe električnom energijom i gdje je opskrba baterijama nesigurna (<https://www.ohio.edu/mechanical/stirling/engines/beta.html>, 2011). Stirling motor je odabran i ponovno uveden u upotrebu zbog njegove jednostavne izvedbe, izrazito tihog rada i mogućnosti korištenja različitih izvora toplinske energije za njegov pogon. Nastavkom razvoja Stirling motora, početkom 1970. godine tvrtka Philips ostvaruje još jedan uspjeh korištenjem ovog motora za kriogeno hlađenje. Stirling kriogeni hladnjaci tehnički su sposobni postići temperaturu nižu od  $-200^{\circ}\text{C}$  što je dovoljno za ukapljivanje kisika ( $\text{O}_2$ ), dušika ( $\text{N}_2$ ), vodika ( $\text{H}_2$ ), argona ( $\text{Ar}$ ) i neona ( $\text{Ne}$ ).

Uz tvrtku Philips i američka tvrtka SunPower Inc. također radi na motoru i ostvaruje znatno unaprijeđenje istog za primjene hlađenja. Različite kompanije koristile su se njihovim modelima, primjerice NASA (engl. National Aeronautics and Space Administration) je u svrhu svemirskih programa i istraživanja prilagođavala i koristila Stirling motor za hlađenje instrumenata unutar satelita (<https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=5414>, 1996). Suvremeni razvoj Stirling motora razvijao se u smjeru nisko temperaturnog motora s mogućnosti rada pri što manjoj razlici temperatura. Veliki doprinos razvoju nisko temperaturnih Stirling motora dao je profesor Ivo Kolin, čiji je motor bio u mogućnosti raditi pri razlici temperature od 20°C (Chen, 2004). Nisko temperaturni Stirling stroj ima široko područje primjene te je krajem 20. stoljeća većinom primjenjivan za iskorištavanje solarne energije. Tajvanska tvrtka Micro-Star International predstavila je Stirling motor kao dio matične ploče računala, čija je uloga hlađenje matične ploče (Koščak Kolin et.al, 2020). Ovaj Stirling motor za pogon koristi toplinsku energiju proizvedenu radom matične ploče što omogućuje znatnu uštedu energije.

U novije doba prema <https://www.nasa.gov/image-feature/kilowatt-reactor-using-stirling-technology-krusty-system> (2018) inženjeri NASA-e koriste Stirling tehnologiju (Krusty sustav) za spuštanje zida vakuumске komore oko kilovatskog reaktora. Ta vakumska komora se kasnije evakuira kako bi simulirala uvjete u prostoru kada Krusty djeluje.

Zbog široke mogućnosti primjene, potencijalno područje gdje se nisko temperaturni Stirling motor može primjeniti je geotermalna elektrana. U usporedbi sa Rankineovim ciklusom koji se najviše koristi u geotermalnoj elektrani, Stirlingov proces pruža određene prednosti. Geotermalni izvori koji su na temperaturi blizu ključanja vode, pružaju mogućnosti primjene nisko temperaturnog Stirling motora.

## 2. OSNOVE RADA STIRLING STROJA

Prvi Stirling stroj se sastojao od vertikalnog cilindra, unutar kojeg se je nalazio tako zvani „displacer“ ili klip premještač, koji je preko koljenastog vratila bio spojen sa zamašnjakom, a na drugom kraju vratila nalazio se drugi cilindar s radnim klipom. Radni medij, zrak u cilindrima bio je povezan, tako da je pomicanje, odnosno rad manjeg tj. radnog klipa ovisio o radu „displacera“. Ovakva izvedba Stirling stroja s dva cilindra kod kojeg se u jednom nalazi radni klip se naziva gama model. S napretkom u razvoju izvedene su i alfa i beta konstrukcije, čije su prednosti kasnije potvrđene (Kolin, 1991).

Uloga „displacera“ koji se kreće unutar vertikalnog cilindra je prijenos radnog fluida, a time i njegove topline kroz radni prostor, s vrha cilindra prema dnu i obrnuto. Pomak koji „displacer“ unutar cilindra obavlja određen je krajnjim gornjim i krajnjim donjim položajem. Njegov promjer je otprilike za 1% manji od promjera cilindra u kojem se nalazi, tako da je kroz prstenasti prostor moguć prolazak radnog fluida. Krajnji donji položaj nalazi se iznad izvora topline gdje se radnom fluidu predaje toplina, a na krajnjem gornjem položaju odvija se hlađenje cilindra tj. odvođenje topline. Pomicanjem radnog klipa unutar vlastitog cilindra ostvaruje se mehanički rad na vratilu stroja, uslijed promjene volumena radnog prostora uzrokovanog izmjenom topline, odnosno temperaturnom razlikom vruće i hladne strane stroja. Djelovanje „displacera“ i radnog klipa odvija se s faznim pomakom od  $90^\circ$ .

Stirling stroj, tzv. gama model djeluje na temelju zatvorenog (kružnog) termodinamičkog procesa u kojemu se odvija ekspanzija i kompresija radnog fluida pri određenoj temperaturnoj razlici tako da se toplinska energija pretvara u mehanički rad. Stirlingov proces koji se odvija unutar motora, sastoji se od četiri ključne promjene. To su izotermna kompresija, izohorno dovođenje topline, izotermna ekspanzija i izohorno odvođenje topline. U trenutku kada se „displacer“ nalazi u krajnjem donjem položaju, radni fluid se nalazi u hladnom gornjem dijelu cilindra, tj. u prostoru za kompresiju, a radni klip se nalazi u krajnjem gornjem položaju. Radni klip počinje se spuštati prema dolje te dolazi do kompresije radnog fluida, kada se „displacer“ pomiče prema gore. Nakon toga se radni fluid premješta u donji dio cilindra i započinje njegova ekspanzija. Kada se radni klip spusti do svojeg krajnjeg donjeg položaja započinje izohorno dovođenje topline radnom fluidu. Predajom topline radnom fluidu, njegov tlak se povećava te dolazi do najvećeg radnog tlaka u procesu. „Displacer“ se nalazi u krajnjem gornjem položaju dok se radni fluid nalazi u toplom prostoru, tj. prostoru za

ekspanziju. Zatim ekspanzija radnog fluida ponovno uzrokuje pomicanje radnog klipa prema gore do njegovog krajnjeg gornjeg položaja, a „displacer“ se pomiče prema dolje te se radni fluid opet premješta u gornji dio cilindra. Radni ciklus je postigao najveći volumen dok je radni klip u krajnjem gornjem položaju te dolazi do izohornog odvođenja topline radnom fluidu uslijed razlike u temperaturi. Odvođenjem topline snižava se tlak te dolazi do njegove najniže vrijednosti. Cijeli se proces periodički ponavlja.

Uz opisani gama model Stirling stroja postoje još dvije osnovne izvedbe stroja, a to su beta i alfa model. Beta model je konstruiran još 1816. godine nakon prve izvedbe stroja iz 1815. godine. Konstrukcijska razlika je u tome što su radni klip i „displacer“ smješteni u istom cilindru. U kasnijem razvoju modernog nisko temperaturnog stroja, pokazalo se da ovakva izvedba ima najveći stupanj djelovanja, zbog zanemarivih mehaničkih gubitaka te uslijed visokog termodinamičkog stupnja djelovanja, gotovo jednakog idealnom slučaju.

Kod beta izvedbe stroja se radni klip nalazi unutar cilindra iznad „displacera“, a radni proces se odvija ekvivalentno opisanom primjeru. Kada je radni klip u krajnjem gornjem položaju, „displacer“ se nalazi u krajnjem donjem položaju, a radni fluid nalazi se u hladnom prostoru između njih. Tada počinje kompresija, radni klip počinje se spuštati prema dolje i komprimira radni fluid. Kada je radni klip došao do svog donjeg položaja, „displacer“ se počinje gibati prema gore te se radni fluid potiskuje ispod displacera u topli prostor. Uslijed povećanja temperature, radni fluid ekspandira i pomiče radni klip ponovno u gornji položaj. „Displacer“ se tada kreće prema dolje, a radni fluid se opet premješta u hladni prostor cilindra.

Za razliku od beta izvedbe, alfa model se sastoji od dva povezana cilindra s klipovima jednake veličine. Jedan cilindar se grije dok se drugi hladi. U trenutku kada se radni fluid nalazi u hladnom cilindru, klip je u gornjem položaju pri najvećem volumenu, a klip u toplom cilindru, u donjem položaju pri najmanjem volumenu. Klip u hladnom cilindru se spušta te započinje kompresija radnog fluida, koji se potiskuje prema toplom cilindru. Nakon zagrijavanja do najveće temperature i tlaka, u toplom cilindru dolazi i do pojave najvećeg volumena fluida, nakon čega započinje njegova ekspanzija. Fluid se tada ponovno giba prema hladnom cilindru te dolazi do njegovog hlađenja i ponavljanja kružnog procesa. Klipovi u cilindrima također djeluju s faznim pomakom od približno  $90^\circ$ , ovisno o različitim konstrukcijama u modernim strojevima.

### 3. NOVE IZVEDBE STIRLING STROJEVA

Uz prikazanu teoriju rada idealnog Stirling procesa, za novije se izvedbe strojeva navode pretpostavke, koje se uzimaju u obzir pri promatranju procesa:

- masa radnog fluida je konstantna, tj. nema gubitaka radnog fluida u stroju;
- zanemarivi otpori trenja u sustavu;
- zanemariva kinetička i potencijalna energija radnog fluida;
- zanemarivi gubitci topline;
- radni fluid je idealni plin s konstantnom specifičnom topline;
- stabilan ciklički rad stroja.

#### 3.1. Prvi nisko temperaturni Stirling stroj

Kao i kod ostalih strojeva tako i kod nisko temperaturnog Stirlinga se rad ostvaruje izmjenom ekspanzije i kompresije radnog fluida. Kako ekspanzija fluida daje više rada, nego li je utrošeno na kompresiju fluida tako razlika navedenih radova predstavlja ostvareni rad procesa. Na temelju indikatorskog dijagrama sa Slike 3-2 moguće je odrediti rad tijekom ekspanzije i rad tijekom kompresije. Rad ekspanzije slijedi iz kružnog integrala pomoću kojeg se računa površina ispod krivulje u p, v-dijagramu, a koja se odnosi na izotermu ekspanziju od najmanjeg volumena do najvećeg volumena u procesu. Ekvivalentno tomu, rad kompresije moguće je odrediti kružnim integralom računanjem površine ispod krivulje hladne izoterme u p, v-dijagramu, od najvećeg do najmanjeg volumena u procesu.

Primjenom prvog glavnog zakona termodinamike o očuvanju energije, dobiveni rad jednak je razlici dovedene i odvedene topline (jednadžba 3-1). Dovedena specifična toplina sadržava topline izohornog grijanja radnog fluida u ekspanzijskom prostoru cilindra,  $q_{2,3}$ , i izotermne ekspanzije,  $q_{3,4}$  (jednadžba 3-2). Odvedena specifična toplina obuhvaća topline izohornog hlađenja radnog fluida u kompresijskom prostoru,  $q_{4,1}$ , i izotermne kompresije,  $q_{1,2}$  (jednadžba 3-3). Sve tri navedene jednadžbe dane su u nastavku:

$$w = q_d - q_o \quad (3-1)$$

gdje su :

- w - specifični rad;
- $q_d$  - dovedena specifična toplina;
- $q_o$  - odvedena specifična toplina;

$$q_d = q_{2,3} + q_{3,4} = (c_v * \Delta T_{2,3}) + (T_{3,4} * \Delta s_{3,4}) \quad (3-2)$$

gdje su:

- $q_{2,3}$  - specifična toplina izohornog grijanja radnog fluida;
- $q_{3,4}$  - specifična toplina izotermne ekspanzije;
- $c_v$  - specifični toplinski kapacitet vode;
- $\Delta T_{2,3}$  - razlika najmanje i najveće temperature procesa;
- $T_{3,4}$  - najveća temperatura;
- $\Delta s_{3,4}$  - razlika entropije na početku i na kraju ekspanzije;

$$q_o = q_{4,1} + q_{1,2} = (c_v * \Delta T_{4,1}) + (T_{1,2} * \Delta s_{1,2}) \quad (3-3)$$

gdje su:

- $q_{4,1}$  - specifična toplina izohornog hlađenja radnog fluida;
- $q_{1,2}$  - specifična toplina izotermne kompresije;
- $\Delta T_{4,1}$  - razlika temperature;
- $T_{1,2}$  - najmanja temperatura;
- $\Delta s_{1,2}$  - razlika entropije na početku i na kraju kompresije.

S obzirom da je ovo idealan proces, razlike temperatura  $\Delta T_{2,3}$  i  $\Delta T_{4,1}$  su identične, odnosno  $\Delta T_{2,3} = \Delta T_{4,1} = \Delta T$ . Također, razlike entropija pri kompresiji i ekspanziji su jednake, tj.  $\Delta s_{3,4} = \Delta s_{1,2} = \Delta s$ . Uz pretpostavku da je specifična toplina u izohornim procesima konstantna, tj.  $c_v = \text{konst.}$ , kombiniranjem izraza dobivaju se jednačbe 3-4, 3-5 i 3-6:

$$w = (c_v * \Delta T_{2,3}) + (T_{3,4} * \Delta S_{3,4}) - (c_v * \Delta T_{4,1}) - (T_{1,2} * \Delta S_{1,2}) \quad (3-4)$$

$$w = c_v * \Delta T + T_{3,4} * \Delta S - c_v * \Delta T - T_{1,2} * \Delta S = T_{3,4} * \Delta S - T_{1,2} * \Delta S \quad (3-5)$$

$$w = (T_{3,4} - T_{1,2}) * \Delta S = \Delta T * \Delta S \quad (3-6)$$

gdje su:

$w$  - specifični rad;

$\Delta T$  - razlika temperature;

$\Delta S$  - razlika entropije

Može se zaključiti da specifični rad procesa ovisi samo o razlici najveće i najmanje temperature i o razlici entropije.

Zadržavanjem izotermnih promjena, Stirlingov proces je jedan od termodinamičkih procesa koji pripadaju procesima sa Carnotovim stupnjem djelovanja. Ovaj stupanj djelovanja ujedno može dati najveću termodinamičku iskoristivost topline u nekom sustavu, a izražava se kao omjer ukupne topline koju daje sustav i topline dovedene sustavu (jednadžba 3-7).

$$\eta_c = \frac{q_d - q_o}{q_d} = \frac{T_{max} * \Delta S - T_{min} * \Delta S}{T_{max} * \Delta S} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{max}} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} \quad (3-7)$$

gdje su:

$\eta_c$  - Carnotov stupanj djelovanja;

$T_{max}$  - najveća temperatura;

$T_{min}$  - najmanja temperatura

Oдавде slijedi da je termodinamički stupanj djelovanja Stirlingovog procesa jednak Carnotovom, odnosno da je (jednadžba 3-8):

$$\eta_s = \frac{w}{q_d} = \frac{q_d - q_o}{q_d} = \frac{(T_{max} - T_{min}) * \Delta s}{T_{max} * \Delta s} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{max}} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} \quad (3-8)$$

gdje je:

$\eta_s$  - Stirlingov stupanj djelovanja.

Na temelju objašnjenog specifičnog rada procesa, inducirana snaga se s termodinamičkog stajališta, kod Stirling stroja, definira kao umnožak obavljenog specifičnog rada i radne brzine motora, odnosno broja okretaja u minuti. Naime, kod definiranja broja okretaja ovog stroja, treba uzeti u obzir da on ovisi o temperaturnoj razlici. Na temelju eksperimentalnih podataka nisko temperaturnog Stirling motora, utvrđeno je da se taj broj povećava proporcionalno temperaturnoj razlici.

Broj okretaja definiran je jednadžbom 3-9, pri čemu je C konstanta proporcionalnosti, ovisna o tome radi li stroj u punom opterećenju ili na nižem nivou raspoložive snage.

$$n = C * \Delta T \quad (3-9)$$

gdje su:

$n$  - broj okretaja;

$C$  - konstanta proporcionalnosti.

Tada se inducirana snaga računa prema jednadžbi 3-10.

$$P = w * n \quad (3-10)$$

gdje je:

$P$  - inducirana snaga.

Jednadžba 3-10 uključuje specifični rad pa ima mjernu jedinicu W/kg. Ako se pretpostavi da je masa radnog fluida u procesu konstantna tijekom rada, dobiva se izraz za induciranu snagu (jednadžba 3-11), kojeg se u realnom proračunu može pomnožiti odnosno umanjiti stupnjem ukupnog mehaničkog djelovanja stroja, a koji iznosi u prosjeku oko 0,9.



$$P = m * w * n \quad (3-11)$$

gdje je:

$m$  - masa radnog fluida.

Kod izračuna snage nisko temperaturnog Stirling stroja, također temeljem eksperimentalnih podataka, izveden je i dodatni izraz pod nazivom „kubični zakon za snagu“, a objedinjuje nekoliko karakterističnih parametara motora (jednadžba 3-17).

Kao prvo uzima u obzir kompresijski omjer, kao jednu od najvažnijih karakteristika pri modernom razvoju Stirling strojeva, što je pojašnjeno kasnije. To je odnos najvećeg i najmanjeg volumena između kojih se odvija Stirling proces te se za ove strojeve općenito kreće u rasponu vrijednosti između 1 i 2. Naime, svaki Stirling stroj s obzirom na svoju izvedbu može raditi u određenim granicama kompresijskog omjera, koji isto tako ovisi i o radnim uvjetima tj. o temperaturnoj razlici, što je dano sljedećom jednadžbom:

$$\varepsilon = \frac{V_{max}}{V_{min}} = 1 + \frac{\Delta T}{1100} \quad (3-12)$$

gdje su:

$\varepsilon$  - kompresijski omjer;

$V_{max}$  - najveći volumen;

$V_{min}$  - najmanji volumen.

S povećavanjem temperaturene razlike dobiva i veći kompresijski omjer, no samo do određenih radnih granica rada stroja, ovisnim također o volumenima iskazanim poveznicom u prethodnim jednadžbama.

Iz jednadžbe 3-12 se može zaključiti da su kod nisko temperaturnih motora optimalni mali kompresijski omjeri, a sukladno tomu oni ostvaruju i manje snage. U izvedbi „kubičnog

zakona za snagu“ se nadalje pojavljuje razlika entropija, koja se za Stirlingov proces može definirati jednadžbom:

$$\Delta s = R * \ln (\epsilon) = R * \ln \left(1 + \frac{\Delta T}{1100}\right) \quad (3-13)$$

gdje su:

$R$  - plinska konstanta;

$\ln (\epsilon)$  - prirodni logaritam kompresijskog omjera.

Za daljnji razvoj ovog zakona potrebno je uz kompresijski omjer i razliku entropije, uvrstiti ostale parametre u jednadžbu 3-23 te masu radnog fluida izraziti preko zakona za idealne plinove, odakle se dobiva jednadžba:

$$P = \frac{p_{atm} * V}{T_{atm} * R} * \Delta T * \Delta s * n \quad (3-14)$$

i jednadžba:

$$P = \frac{p_{atm} * V}{T_{atm} * R} * \Delta T * R * \ln \left(1 + \frac{\Delta T}{1100}\right) * C * \Delta T \quad (3-15)$$

gdje su:

$p_{atm}$  - atmosferski tlak;

$V$  - volumen;

$T_{atm}$  - atmosferska temperatura.

„Kubični zakon za snagu“ se u ovom koraku može vidjeti po trostrukom pojavljivanju temperature razlike. Pošto se izraz pod prirodnim logaritmom ne može dalje izvesti analitički, grafo-analitičkom metodom utvrđeno je sljedeće:

$$w = \Delta T * \Delta s = \Delta T * R * \ln \left(1 + \frac{\Delta T}{1100}\right) = 0,00006 * \Delta T^2 \quad (3-16)$$

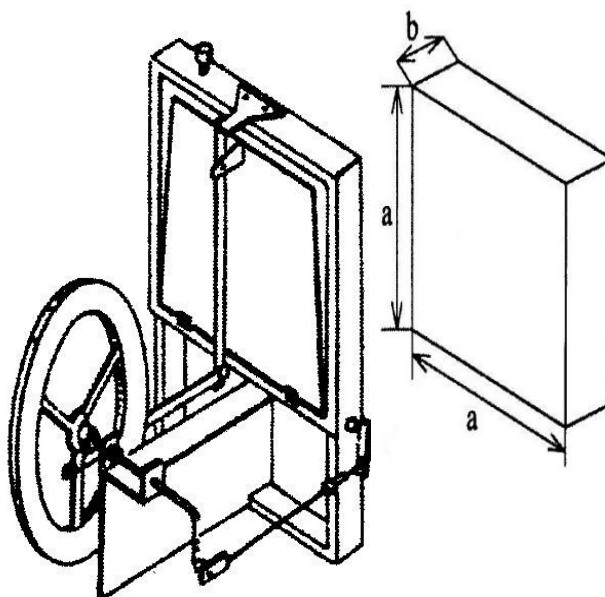
Na kraju izvoda se pretpostavlja da je broj okretaja konstantan, te se uvrštavanjem ostalih vrijednosti dobiva konačni izraz kubičnog zakona za snagu nisko temperaturnog stroja:

$$P = \frac{V \cdot \Delta T^3}{2 \cdot 10^8} \quad (3-17)$$

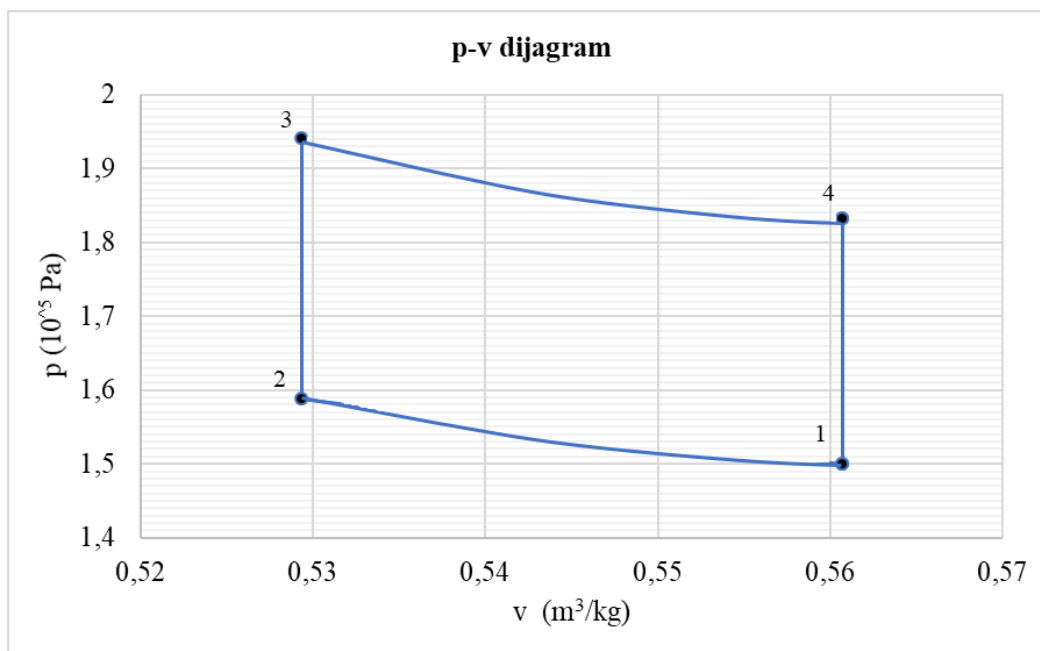
S obzirom da se u navedenoj jednadžbi 3-17 pojavljuje volumen, u nastavku su definirani karakteristični volumeni koji se ostvaruju pri radnom procesu, a odnose se na beta izvedbu plosnatog tzv. Stirling-Kolinovog stroja.

### **3.1.1. Proračun snage nisko temperaturnog Stirling stroja**

Na temelju ulaznih parametara izrađen je proračun snage za plosnati Stirling-Kolin motor (Tablica 3-1.). Ulogu cilindra u ovoj beta izvedbi ima kutija, čije su površine stranice kvadratne, s duljinom stranice  $a$  (Slika 3-1.). Pomoću istih podataka dobiven je indikatorski dijagram (Slika 3-2.) za navedeni slučaj maksimalnih dimenzija kutije od 100 cm x 100 cm.



**Slika 3-1.** Stirling-Kolinov stroj i dimenzije cilindra (Kolin,1991)



**Slika 3-2.** Indikatorski p,v-dijagram idealnog Stirling procesa

**Tablica 3-1.** Ulazni parametri za proračun snage Stirling stroja

| Ulazni parametri                      |          |
|---------------------------------------|----------|
| najveća temperatura, $T_{\max}$ (°C)  | 85       |
| najmanja temperatura, $T_{\min}$ (°C) | 20       |
| početni tlak, $p_1$ ( $10^5$ Pa)      | 1,5      |
| početni volumen, $V_1$ ( $m^3$ )      | 0,210794 |
| broj okretaja u minuti, $n$ (okr/min) | 60       |
| duljina kutije motora, $a$ (cm)       | 100      |

Proračun je rađen u Pythonu, programu za skriptiranje s ulaznim podacima iz tablice 3-1. ovog rada. Korištena je verzija Python 2.7 i pripadajući editor Spyder 2.7 za pisanje koda.

Prema indikatorskom p, v-dijagramu radnog procesa vidljivo je da se on odvija između najmanjeg i najvećeg volumena. Ukoliko su poznate dimenzije plosnatog, tzv. „flat-plate“ motora, onda duljina stranice kutije u ovom slučaju ima teoretsku ulogu cilindra (slika 3-1.) dok se preostali volumeni mogu izraziti jednačbama 3-18, 3-19 i 3-20, a odnose se na volumen kutije, „displacera“ i na tzv. „stroke volume“:

$$V_k = 0,25 * a^3 \quad (3-18)$$

gdje su:

$V_k$  - volumen kutije;

$a$  - duljina stranice kutije.

U sljedećoj jednačbi dan je volumen „displacera“:

$$V_d = 0,0451 * a^3 \quad (3-19)$$

te „stroke volumen“:

$$\Delta V = 0,0496 * a^{2,68798} \quad (3-20)$$

Iz navedenih volumena koji ovise o konstrukciji i dimenzijama motora potrebno je na isti način, tj. u ovisnosti o duljini stranice kutije, izraziti i ukupni, najveći i najmanji volumen pomoću jednačbi 3-21, 3-22 i 3-23.

$$V_{uk} = V_k - V_d = 0,205 * a^3 \quad (3-21)$$

$$V_{max} = V_{uk} + \frac{\Delta V}{2} \quad (3-22)$$

$$V_{min} = V_{uk} - \frac{\Delta V}{2} \quad (3-23)$$

gdje su:

$V_{uk}$  - ukupni volumen;

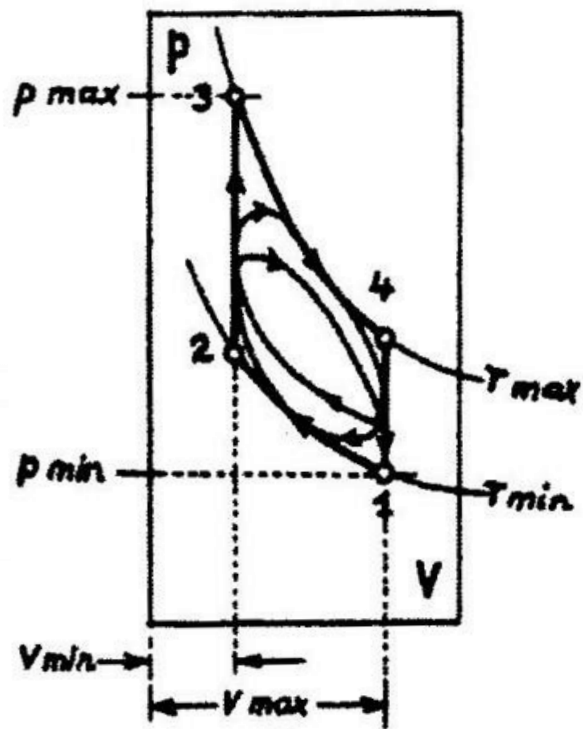
$V_{max}$  - najveći volumen;

$V_{min}$  - najmanji volumen

Za uvrštavanje potrebnog volumena u „kubični izraz za snagu“ koristi se ukupni volumen, a u nastavku je opisana procedura izračuna stvarne snage s pomoću tzv. Schmidtovog faktora.

Kako je u ovakvoj izvedbi Stirling stroja gibanje „displacera“ i radnog klipa gotovo sinusoidalno, ono se radi lakšeg pristupa u matematičkom proračunu uzima kao potpuno sinusoidalno. To gibanje uzrokuje ovalnost stvarnog p,v -radnog dijagrama, smanjujući mu površinu u odnosu na idealnu, na način da indikatorski dijagram dodiruje politrope procesa pri čemu kutovi idealnog procesa ostaju neobuhvaćeni. To se očituje u termodinamičkim gubicima, koji su neizbježni, jer je idealni proces u stvarnosti neizvediv. Međutim, upravo je najveća termodinamička prednost ovog stroja što ima maksimalno mogući toplinski stupanj djelovanja, odnosno da su gubici zanemarivi, a što se povezuje s ekvivalentnom termodinamičkom djelotvornošću idealnog Carnotovog procesa

Omjer stvarne i idealne površine indikatorske krivulje p,v-dijagrama iskazuje se tzv. Schmidtovim faktorom ( $f_s$ ). Do redukcije idealnog indikacijskog dijagrama dolazi zbog mnogih različitih faktora, kao što su otpori zbog trenja pri radu klipova koji se i svakom drugom stroju pojavljuju. Do ovog smanjenja također dolazi i zbog utjecaja, tzv. „mrtvog volumena“ (engl. dead space), koji se najviše javlja u izmjenjivačima topline. Također do redukcije površine dijagrama dolazi zbog mehaničkog učinka same izvedbe stroja, kao i zbog mogućnosti, tzv. „curenja“ radnog fluida kroz kućište. U izmjenjivačima topline nije moguće ostvariti idealan učinak, odnosno nije moguće svu toplinu iz izmjenjivača prenijeti na radni fluid. Konstrukcijsko poboljšanje pri kojem se radni dijagram može znatno povećati je izvedba pločastih izmjenjivača topline, jer oni uvelike smanjuju „mrtvi prostor“, odnosno povećavaju površinu indikatorskog dijagrama, jer se proces širi prema izotermama (slika 3-3.). Povećanjem radnog dijagrama stroja, posljedično se dobiva i veća snaga samog stroja, što slijedi iz povećanog stupnja djelovanja.



**Slika 3-3.** Realni indikatorski dijagram (Koščak Kolin, 2000)

Parametar koji određuje površinu radnog dijagrama Stirling procesa je Schmidtov faktor. Taj faktor pokazuje za koliko je postotno površina stvarnog ciklusa manja od idealnog ciklusa. Razmatrajući termodinamički odnos, Schmidtov faktor pretpostavlja da je ukupna masa radnog fluida u stroju jednaka zbroju mase fluida u hladnom i toplom prostoru, jer su u kontaktu. Iz ove pretpostavke proizlazi da je tlak unutar stroja jednak te se može izvesti preko zakona za idealni plin. Prema Schmidtovoj teoriji računa prema jednadžbi 3-24.

$$p = \frac{m \cdot R}{\frac{V_c}{T_c} + \frac{V_h}{T_h}} \quad (3-24)$$

gdje su:

- $p$  - tlak;
- $m$  - masa radnog fluida;
- $V_c$  - hladni volumen;

- $T_c$  - hladna temperatura;  
 $V_h$  - vrući volumen;  
 $T_h$  - vruća temperatura.

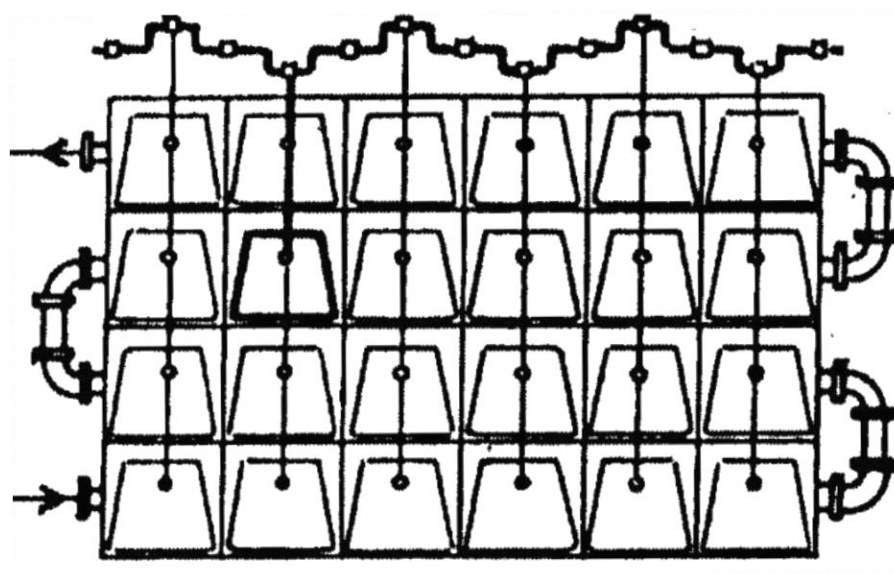
Schmidtov proces se prema navedenoj jednadžbi 3-24 odnosi na realno ostvareni rad procesa, koji se također može izraziti pomoću Schmidtovog faktora, koji uključuje „mrtvi volumen“ (jednadžba 3-25).

$$f_s = 74 - 0,68 * V_o \quad (3-25)$$

gdje su:

- $f_s$  - Schmidtov faktor;  
 $V_o$  - „mrtvi volumen“.

Primjenom ove metodologije u programu Pytonu dobivena je snaga jednog stroja, odnosno jedne modularne jedinice u iznosu od približno 0,25 kW, što znači da bi za 1 kW trebalo serijski povezati četiri motora, dimenzija 1 m x 1m (slika 3-4.).



**Slika 3-4.** Modularna konstrukcija Striling strojeva povezanih u seriju (Koščak-Kolin)



S obzirom da se binarni proces za dobivanje električne energije u geotermalnim elektranama ne može izravno usporediti sa snagom Stirling strojeva, koji mogu raditi i pri nižim temperaturama od onih koje su neophodne za binarne geotermalne elektrane, ipak je moguće izračunati koliko bi ovakvih modularnih jedinica trebalo da se dobije ekvivalent snage za elektranu od 1 MW. U navedenom primjeru se opisani stroj može povezati u modelarnu konstrukciju s jediničnim snagama od 0,25 kW, što znači da bi za postizanje snage od 1 MW bilo potrebno 4000 ovih jedinica, čije su dimenzije 1 m x 1m. Ovdje se dolazi do problema vezanog uz potreban prostor za smještaj ovakve potencijalne Stirling-elektrane, koja bi u ovom slučaju iznosila oko 4000 m<sup>2</sup>. Uzimajući u obzir i ostale dijelove ovakvog postrojenja, može se pretpostaviti da bi za njegov smještaj bio dovoljan teren od 100 m x 100 m. No, sunčane elektrane za proizvodnju velikih snaga zauzimaju i puno veće površine, tako da se s obzirom na ostale prednosti Stirling strojeva, ovaj problem površine može uzeti kao neizbježna okolnost u postizanju konačnog cilja, a to je 'čista' energija.

### **3.2. Suvremeni razvoj nisko temperaturnih Stirling strojeva u svijetu**

U cilju razvoja Stirling strojeva i povećanja njihove snage, mnoge konstrukcijske izmjene te izmjene u dizajnu su provdene kroz njihov povijesni razvoj. Kako bi se što više smanjili toplinski gubici u stroju, uveden je regenerator, kao dodatni izmjenjivač topline. S jedne strane, prolaskom radnog fluida od kompresijskog prostora do ekspanzijskog prostora, gdje se fluid grije, može ga se na tom putu još dodatno ugrijati. S druge strane, kretanje fluida od ekspanzijskog prostora do kompresijskog prostora, gdje se fluid hladi, može ga se dodatno ohladiti prije ulaska u kompresijski prostor. Ova pretpostavka se ostvaruje upotrebom regeneratorskog prostora koji se postavlja između toplog i hladnog prostora. Dakle, nakon grijanja i prolaskom kroz ekspanzijski prostor radni fluid predaje dio svoje topline regeneratoru te se ta predana toplota u njemu skladišti, a fluid je djelomično ohlađen prije ulaska u kompresijski prostor. Na povratku iz kompresijskog prostora, regenerator hladnom fluidu predaje toplinu, koju je prethodno zadržao te se fluid djelomično ugrije pri ponovnom ulasku u ekspanzijski prostor.

Prema Koščak Kolin (2001) usporedbom pločastih i tubularnih izmjenjivača topline, teoretski je moguće ostvariti da se korištenjem pločastih izmjenjivača topline umjesto

tubularnih smanji „mrtvi prostor“ čak do četiri puta. Na temelju proračuna snage motora s pločastim i tubularnim izmjenjivačem te korigiranjem snage uz Schmidtov faktor se zaključilo ukoliko se tubularni zamjeni pločastim izmjenjivačem, može se dobiti i do tri puta veća snaga motora.

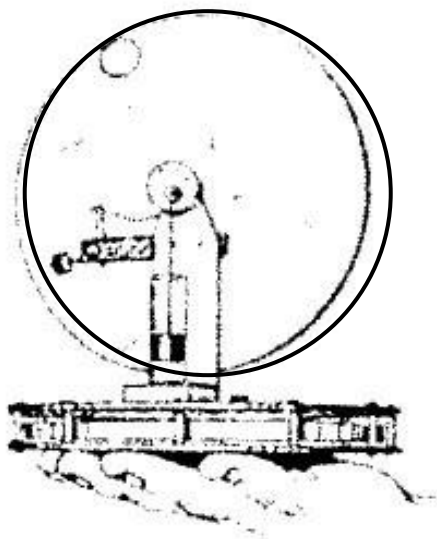
Osnovna podjela Stirling motora se može sažeti s obzirom na tzv. „pokretačku moć“ zbog koje motor može započeti svoje djelovanje. U ovom slučaju ta se činjenica odnosi na temperaturnu razliku kao temeljni faktor rada bilo kojeg toplinskog stroja pa tako i Stirling stroja. Stoga se, Stirling motori dijele na nisko temperaturne i visoko temperaturne motore. Primjena visoko temperaturnih Stirling motora u svijetu je raširenija, a na slici 3-5 je prikazana njihova uporaba u Kini.



**Slika 3-5.** Stirling stroj snage 10 kW, Ordos, Kina (Baumueller, 2012)

Prednost, odnosno zanimljivost nisko temperaturnih Stirling motora u odnosu na druge toplinske strojeve očituje se u činjenici, kao što i naziv stroja govori, da se može pokrenuti u prisustvu niske temperaturne razlike. Prvi nisko temperaturni Stirling motor konstruiran je 1980. godine, a radio je na razlici temperatura od  $44^{\circ}\text{C}$  a kao pogonsko gorivo je upotrijebljena vruća voda (Kolin, 1991). Značajan napredak je ostvaren 1982. godine, kada je hrvatski znanstvenik i izumitelj Ivo Kolin taj motor predstavio na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu, Sveučilišta u Zagrebu. Konstruirao je Stirling motor koji je radio svega na temperaturnoj razlici ispod  $20^{\circ}\text{C}$

(slika 3-1.). Mnogu drugi znanstvenici su unaprijeđivali njegov izum smanjujući temperaturnu razliku rada stroja. Za rekordni izum zaslužan je profesor James Senft koji je 1991. godine prezentirao svoj Stirling motor koji je radio na izuzetno maloj temperaturnoj razlici od svega 0,5°C (Kolin, 1991). Da bi se njegov motor mogao pokrenuti, dovoljna je toplina ljudskog dlana (slika 3-6.).



**Slika 3-6.** Senftov nisko temperaturni Stirling stroj (Kolin, 1991)

Najveći razvoj Stirling-Kolinovog stroja napravljen je u Japanu, na Sveučilištu Saitama, a jedan od modela snage 250 W sa Fukushima National College of Technology prikazan je na slici 3-7.



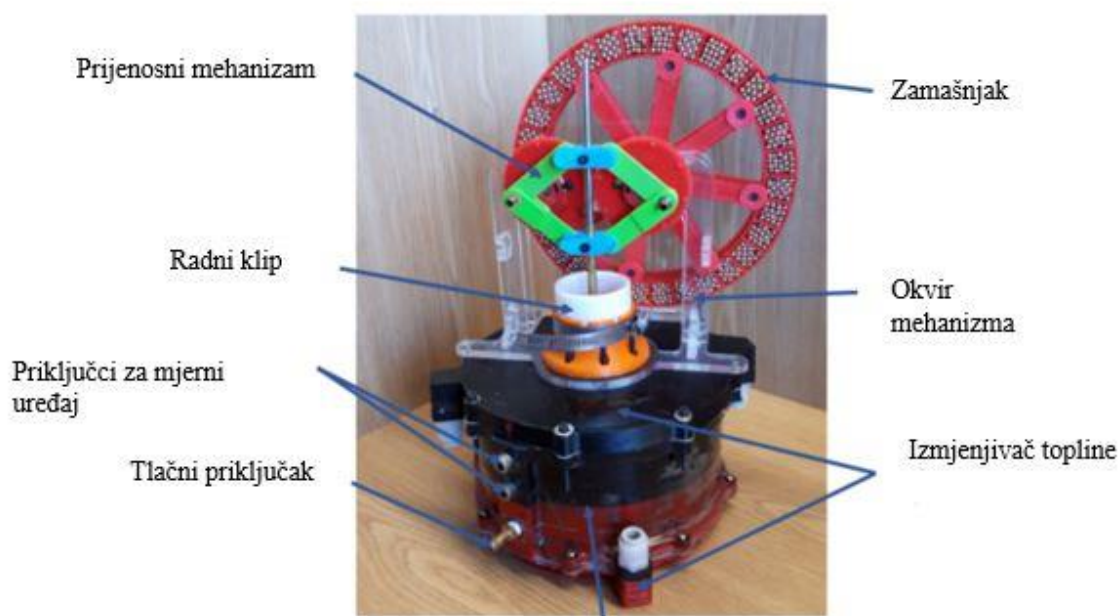
**Slika 3-7.** Nisko temperaturni model snage 250 W, Japan (Isshiki, 2012)

Zbog svoje sposobnosti pokretanja na niskim temperaturnim razlikama, Stirling stroj bi mogao ostvariti svoju upotrebu u geotermalnim elektranama te pokretati iskorištavanjem otpadne topline iz industrijskih postrojenja sagorijevanjem biomase (drvena biomasa, poljoprivredni i životinjski ostatci i slično). Time bi se mogao upotrijebiti i na mnogim drugim mjestima gdje postoji mogućnost primjene korištenja topline iz postojanog izvora topline za obavljanje rada s obzirom na temperaturnu razliku radnog okoliša stroja u svrhu proizvodnje električne energije. U nastavku je opisano nekoliko projekata s ciljem razvoja i ispitivanja nisko temperaturnih Stirling strojeva.

### 3.2.1. Kanada

Na Sveučilištu u Alberti proveden je pokus sa ciljem optimizacije parametara nisko temperaturnih Stirling motora kako bi se postigla najveća moguća izlazna snaga. U tu svrhu su konstruirana tri različita motora The Mark1, Mark 2 i The EP-1 (Stumpf, 2019). Sva tri motora su dizajnirana kao gama modeli te su realizirani tehnikom 3D printanja. Kao izvor topline, odnosno za grijanje stroja korištena je voda iz geotermalnih izvora u Alberti, a njezina temperatura iznosi 95°C. Za hladni spremnik korištena je temperatura od 2°C što odgovara prosječnoj temperaturi atmosfere za to područje. Za radni fluid odabran je zrak, a radni tlak jednak je atmosferskom. Mark 1 je mali ispitni motor napravljen u veličini igračke za teoretsko sagledanje samog dizajna, konstrukcije i puštanja motora u pogon te nije bio mjerodavan za sagledavanje radnih parametara zbog tehničkih ograničenja. Korišteni su pločasti izmjenjivači topline napravljeni od bakra i aluminija zbog smanjenog „mrtvog prostora“ i manjeg gubitka topline. Tijelo motora je kućište za „displacer“, a regenerator je izveden kao prstenasti prostor između kućišta motora i „displacera“. Štap „displacera“ se nalazi iznad cilindra radnog klipa i prolazi kroz njega, a na taj isti štap je konstruiran mehanizam koji osigurava kretanje zamašnjaka. Na temelju Mark 1 motora se zaključuje da za pokretanje motora, „displacer“ mora biti što je moguće lakši, kako bi se smanjio rad potreban za podizanje „displacera“, koji treba pasti pod svojom težinom kad je usidren u mehanizam. Ukoliko se to postigne, trenje je u zadovoljavajućim granicama. Mark 2 je napravljen po uzoru na Mark 1, ali većeg kapaciteta. Moguće je mijenjati izmjenjivače topline, radni klip, regenerator i mehanizam motora u svrhu optimiziranja parametara. Svrha izrade ovog motora je pronalazak vrijednosti kompresijskog omjera i faznog pomaka za proizvodnju najveće moguće snage motora. Mijenjanjem navedenih parametara se zaključilo da je motor proizveo najveću moguću snagu pri faznom pomaku od 90° i kompresijskom omjeru od 1,097. Opterećivanjem motora radna brzina motora se smanjuje te se zabilježilo da je motor dao najveću moguću snagu od 0,26 W pri 27 okr/min. Treći motor The EP-1 je konstrukcijski najsloženiji. Na tom motoru je također ispitivana snaga uz prilagođavanje kompresijskog omjera i faznog pomaka, lokacije izmjenjivača topline i torzijskog opterećenja. Eksperimentalno je utvrđeno da motor ostvaruje bolji učinak kada je radni klip povezan s ekspanzijskim prostorom. Kao primarni, korišten je fazni pomak od 90° jer je utvrđeno da on daje najveći inducirani rad. Za određeni kompresijski omjer, povećanjem torzijskog opterećenja motora, njegova se radna brzina smanjuje. Takav rezultat s primjenjenom

najvećom mogućom torzijom daje najmanju radnu brzinu motora. Pri određenom kompresijskom omjeru, povećava se snaga motora te doseže maksimalna vrijednost kako se povećava brzina motora. Zatim se snaga motora smanjuje zbog smanjenja radne brzine motora, a ona je posljedica primjenjenog torzijskog opterećenja koje smanjuje radnu brzinu. Činjenica da je snaga ovisna o torziji i o radnoj brzini objašnjava upravo navedenu tezu. Općenito, povećanjem kompresijskog omjera slobodna radna brzina se smanjuje, a pri opterećenju na višim kompresijskim omjerima motor ima veću radnu brzinu. Utvrđeno je da kompresijski omjer od 1,20 pri brzini od 74 okr/min proizvodi maksimalnu snagu od 7 W (slika 3-8.).



**Slika 3-8.** Stirling model Mark 1 (Stumpf, 2019)

### 3.2.2. Tajvan

Prema Koščak Kolin et. al (2009) tajvanska kompanija MSI (Micro Star Internationala), koja se bavi dizajniranjem i proizvodnjom matičnih ploča došla je na ideju primjene nisko temperaturnih Stirling motora u informatičkom svijetu, odnosno u tehnologiji izvedbe matične ploče. Ideja proizlazi iz činjenica da se Stirling motor pokreće zbog temperaturne razlike te kao pokretač koristi toplinu koja se generira na matičnoj ploči prilikom rada računala. Na temelju

ove činjenice, kompanija je patentirala prvi hladnjak na matičnoj ploči koji ne treba izvor energije. Dakle, uloga Stirling motora u ovoj primjeni je da pokreće ventilator za rashlađivanje matične ploče. Toplina proizvedena na matičnoj ploči prenosi se na mali Stirling motor čijim radom motora se pokreće ventilator koji je ugrađen na koljenasto vratilo motora, te se na taj način hladi matična ploča računala (slika 3-9.).



**Slika 3-9.** Stirling stroj na matičnoj ploči (Koščak Kolin, 2009)

### 3.2.3. Njemačka

Još jedan vrlo važan praktičan primjer nisko temperaturnog Stirling motora je solarni nisko temperaturni Stirling motor SUNWATER®. Projekt ovog motora dizajniran je i konstruiran u Dresdenu (Savezna Republika Njemačka) te je 2001. godine prvi put predstavljen javnosti (Chen, 2004). Svrha ovog projekta je predstaviti visoko učinkoviti motor za potrebe opskrbe vodom u područjima gdje je moguće koristiti sunčevu energiju. Motor je povezan s pumpom te omogućava opskrbu regija vodom, gdje postoji problem dobave pitke i tehnološke vode. Zbog svoje visoke učinkovitosti, jednostavnosti izrade, sigurnosti, jednostavnog

upravljanja, niskih troškova te malog utjecaja na okoliš, motor predstavlja alternativno rješenje decentralizacije opskrbe vodom u regijama kao što su Afrika, Južna Amerika i dijelovi Azije gdje nije moguće uspostaviti centralni sustav vodoopskrbe i gdje se javljaju problemi kao što su instalirani dizel motori koji nose visoke troškove održavanja, zaostala infrastruktura za opskrbom goriva za motore, povećane emisije stakleničkih plinova i negativan utjecaj istih na okoliš zbog izgaranja. Osnovni dijelovi ovog solarnog modela su apsorber, premještač, radni klip, regenerator i hladnja, a kao radni fluid koristi zrak. Sunčeva energija se apsorbira preko apsorbera, koji je smješten na gornjoj strani motora u kojemu se grije zrak. Donji hladni prostor, odnosno hladnjak predstavlja cijev kroz koju struji mlaz hlade vode koju hladi zrak. Premještač premješta zrak iz toplog prostora u hladni i nazad, uz to ga premješta u međuprostore, no prvo prolazi kroz regenerator. Uz apsorber mora postajati izmjenji-vač topline koja uz njega sudjeluje u prijenosu topline. Te komponente moraju biti napravljene od materijala, kao što su aluminij, čelik ili bakar, tako da se zadovolji veliki toplinski kapacitet i vodljivost te se omogući što efikasniji prijenos topline na radni fluid, zrak. Kako bi se što više smanjili gubitci topline, kućište motora napravljeno je od slabovodljivog, termički otpornog materijala (izolatora). U ovom slučaju je izabran polimer polifenilensulfid. U cilju optimizacije prstenastog prostora radnog klipa i kućišta za maksimalnu efikasnost i postignutu snagu te savladavanje otpora zbog trenja, izabrana je guma kao materijal radnog klipa. Premještač, u ulozi premeštanja zraka iz toplog u hladni prostor i nazad, mora biti lagan te male toplinske vodljivosti i visokog toplinskog otpora. Za lakše premještanje zraka konstruirana je jedna centralna osovina koja omogućuje stabilno pomicanje gore i dolje. Motor radi na razlici temperatura većoj od  $20^{\circ}\text{C}$ , temperatura apsorbera je između  $65$  i  $120^{\circ}\text{C}$  dok je temperatura vode za hlađenje  $20^{\circ}\text{C}$ . Postignuta mehanička snaga motora je  $20\text{ W}$  uz kompresijski omjer od  $1,055$  i radnu brzinu od  $20$  do  $40$  okr/min. Težina motora iznosi  $240\text{ kg}$ , a površina apsorbera  $1,75\text{ m}^2$ . Mjerenjem je pokazano da povećanjem broja okretaja motora temperatura na apsorberu, odnosno vrućeg zraka na strani apsorbera pada. Korigiranjem broja okretaja postoji optimalni raspon broja okretaja pri kojem motor postiže najveću snagu. Kao i sa brojem okretaja, povećanjem kompresijskog omjera smanjuje se temperatura na strani apsorbera. Pri određenom broju okretaja, povećanjem kompresijskog omjera snaga raste, no opet postoji optimalni raspon kompresijskog omjera za maksimalnu snagu motora. Vrijednost faznog pomaka pri kojem motor proizvodi maksimalnu snagu kreće se oko  $90^{\circ}$  (slika 3-10).





**Slika 3-10.** Solarni nisko temperaturni Stirling stroj SUNWATER® (Chen, 2004)

#### 4. ZAKLJUČAK

Za izračun teoretske inducirane snage koju može ostvariti jedna modularna jedinica odabranog nisko temperaturnog Stirling stroja potreban je relativno mali broj ulaznih podataka (tablica 3-1). Ulazni podatci za pisanje koda uneseni su i uređivani u programu za skriptiranje Python 2.7 (editor Spyder). Iz Pythonovog modula CoolProp preuzeti su parametri za izračun tlakova, temperatura i volumena kod Stirlingovog procesa. Pomoću tih parametara izračunate su vrijednosti izmjenjenih toplina i rada motora u karakterističnim točkama procesa. Na temelju izračunatih vrijednosti se pomoću programa dolazi do teoretske inducirane snage jedne modularne jedinice Stirling stroja u iznosu od 0,25 kW.

Iako jedna modularna jedinica daje malu snagu, Stirling motor ima brojne prednosti koje mu pružaju široku mogućnost primjene u praksi. Ne samo da mu je učinkovitost ekvivalentna Carnotovom stupnju djelovanja, već može raditi pri izrazito niskim razlikama temperature. Osim toga moguće ga je pokrenuti iz različitih izvora energije, nema štetnih emisija, te je module moguće povezati u seriju kako bi se ostvarila veća snaga.

Zbog svojih neobičnih karakteristika, Stirling motor se može primjeniti u različitim industrijskim postrojenjima kao što su bioelektrane-toplane, geotermale elektrane, zatim za potrebe opskrbe vodom u područjima gdje je moguće koristiti sunčevu energiju, kao motori za kriogeno hlađenje te na brojnim mjestima gdje postoje mogućnosti iskorištavanja razlike temperature dovedene i odvedene topline.

Stirling stroj, za razliku od geotermalne elektrane koja koristi postojeći Rankineov proces, pruža alternativu sa svojim Stirling termodinamičkim procesom. Osim što Stirling proces ima veću učinkovitost, konstrukcijski je jeftiniji zbog manjeg broja elemenata, te se serijskim povezivanjem više modularnih jedinica postiže potrebna snaga koja može biti jednaka snazi ostvarenoj u Rankineovom procesu. Jedan od nedostataka je relativno velika površina koju zauzimaju serijski spojeni moduli, ali ovaj utjecaj je manje značajan u odnosu na prednosti Stirling strojeva, kao što su termodinamička učinkovitost i ekološka prihvatljivost.

## 5. LITERATURA

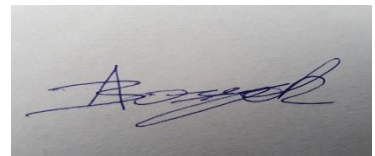
1. BAUMUELLER, A., 2012. *Renewable Applications*. U: 15th ISEC, Dubrovnik, Hrvatska, 27.09. 2012.
2. BUDIN, R., MIHELIĆ-BOGDANIĆ, A., 2002. *Osnove tehničke termodinamike*. Zagreb: Školska knjiga.
3. CHEN, D., 2004. *Untersuchungen zur Optimierung eines solaren Niedertemperatur-Stirlingmotors*. Dresden: Fakultät Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden, doktorska disertacija.
4. CIPRI, K., LUCENTINI, M., KOŠČAK KOLIN, S., 2003. *Stroke Volume Depending Upon Working Temperature*. U: The 11th International Stirling Engine Conference, Rim, Italija, 19-21.11. 2003., 173-178.
5. ISSHIKI, S., HOSHINO, Y., ISSHIKI, N., 2012. *Study of the indicated work of Stirling engines using pin-fin heat exchangers*. U: 15th ISEC, Dubrovnik, Hrvatska, 27.09. 2012.
6. KOLIN, I., 1991. *Stirling motor: history- theory- practice*. Zagreb: Zagreb University Publications.
7. KOLIN, I., KOŠČAK KOLIN, S., GOLUB, M., 2000. *Geothermal Electricity Production by Means of the Low Temperature Difference Stirling Engine*. U: World Geothermal Congress, Kyushu Tohoku, Japan, 28.05-10.06.2000., 3199-3203.
8. KOŠČAK KOLIN, S., 1999. *Ecological Limit of the Flat Plate Engines*. U: The 9th International Stirling Engine Conference and Exhibition, Pilanesburg, Južnoafrička Republika, 02-04.06. 1999., 239-245.
9. KOŠČAK KOLIN, S., 2001. *Towards Further Development of the Low  $\Delta T$  Engines*. U: The 10th International Stirling Engine Conference, Osnabruck, Njemačka, 24-26.09. 2001., 432-438.
10. KOŠČAK KOLIN, S., MIHELIĆ-BOGDANIĆ, A., NASO, V., 2009. *The First Cooler on a Computer Mainboard Powered by the Low DT Stirling Engine*. U: The 14th International Stirling Engine Conference, Groningen, Nizozemska, 16-18.11. 2009., 1-5
11. STUMPF, C., 2019. *Parameter Optimization of a Low Temperature Difference Gamma-Type Stirling Engine to Maximize Shaft Power*. Alberta: Department of Mechanical Engineering University of Alberta, doktorska disertacija.

Web izvori:

1. BETA TYPE STIRLING ENGINE, 2011. URL: <https://www.ohio.edu/mechanical/stirling/engines/beta.html>. (05.05.2020.).
2. ENCYCLOPEDIA BRITANNICA, 2020. URL: <https://www.britannica.com/biography/Robert-Stirling>. (05.05.2020.).
3. Jet Propulsion Laboratory, 1996. URL: <https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=5414>. (06.05.2020.).
4. NASA, 2018. URL: <https://www.nasa.gov/image-feature/kilowatt-reactor-using-stirling-technology-krusty-system>. (06.05.2020.).
5. WIKIPEDIA, 2020. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Stirling\\_engine](https://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_engine). (05.05.2020.).

## IZJAVA

*Izjavljujem da sam ovaj završni rad pod naslovom “Razvojni pravci nisko temperaturnog Stirling stroja u svijetu” izradio samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu, služeći se navedenom literaturom.*

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Antun Bošnjak', is shown on a light-colored background.

Antun Bošnjak



KLASA: 602-04/20-01/60  
URBROJ: 251-70-03-20-3  
U Zagrebu, 03.07.2020.

**Antun Bošnjak, student**

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM: 602-04/20-01/60, UR.BR. 251-70-12-20-1 od 06.04.2020. godine priopćujemo temu završnog rada koja glasi:

### RAZVOJNI PRAVCI NISKO TEMPERATURNOG STIRLING STROJA U SVIJETU

Za voditeljicu ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o završnom ispitu dr. sc. Sonja Koščak Kolin, docentica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

**Voditeljica**

(potpis)

Doc. dr. sc. Sonja Koščak Kolin

(titula, ime i prezime)

**Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite**

(potpis)

Doc. dr. sc. Vladislav Brkić

(titula, ime i prezime)

**Prodekan za nastavu i  
studente**

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Dalibor Kuhinek

(titula, ime i prezime)