

RECIKLAŽA ENERGIJE S STIRLINGOVIM PROCESOM



**PREDSTAVITEV TOPLOTNEGA STROJA SPP 4-106 HIGHLIFT -
VISOKOTEMPERATURNNA INDUSTRIJSKA TOPLOTNA ČRPALKA**

AVTOR: MATEVŽ ČOKL, IMP PROMONT D.O.O.



Slika 1: Toplotna črpalka SPP 4-106 HL

POVZETEK

Industrijsko in ekološko razvite države sveta se že dalj časa zavedajo posledic neučinkovite rabe energije, še posebej energije, ki je proizvedena iz primarnih, fosilnih virov energije.

Po grobi oceni izgublamo okoli 50 % vse energije, vključno s transportom. Večinoma se izgublja v obliki nizkotemperaturne toplote.

Izkoriščanje ali reciklaža tega izgubljenega deleža energije pa bo tudi v prihodnje zelo pomembno poglavje v energetiki. Za razvoj novih sistemov in naprav, ki bodo sposobna iz te energije narediti novo, uporabno vrednost, bodisi v obliki elektrike ali toplote na visokem temperaturnem nivoju pa predstavlja pravi tehnološki in inženirski izziv in to prav v vseh industrijskih panogah.

Če se dotaknem npr. avtomobilizma,

kjer poskušajo težave z izgubo primarne energije v obliki toplotne energije, ki se sprošča ob zaviranju, reševati s pomočjo hibridnega sklopa, ki lahko ob zaviranju pretvori okoli 30 % toplotne energije v električno. Zahtevna in draga, pa vendar verjetno ta moment najučinkovitejša nadgradnja obstoječega motorja z notranjim zgorevanjem.

V industriji, kjer so količine odpadne toplote še toliko večje, pa je na voljo precej tehničnih rešitev. Eno takšnih, še vedno malo eksotičnih, pa vam želim predstaviti v nadaljevanju članka. Morda se bo kdo izmed vas spraševal, kaj pa ima ta naprava z zemeljskim plinom in njegovo porabo!? Predlagam, da članek preberete do konca in boste videli, da se je zaradi umestitve takšne toplotne črpalke v industrijski obrat povečal ponor toplote iz vročevoda in posledično se je povečala poraba zemeljskega plina v toplotni.

UVOD

Trend izkoriščanja odpadne industrijske toplote oz. njena reciklaža, tako zaradi skupnega boja k zniževanju izpustov škodljivih emisij v ozračje in samega direktnega segrevanja ozračja kot na drugi strani vsesplošnega trenda zniževanja rabe primarne energije, ni nič novega. Se pa tej problematiki v zadnjem času posveča vse bolj, saj je to lahko velika poslovna priložnost.

Večina odpadne toplote nastaja kot stranski proizvod tehnoloških procesov in se pojavlja na različnih temperaturnih nivojih. Večinoma kot nizkotemperaturna, zato predstavlja ponovna uporaba ali energetske učinkovit ponor pri končnem porabniku iz tega nivoja pravi inženirski izziv, tako iz tehničnega kot tudi ekonomskega vidika.

Največ odpadne toplote nastaja v industrijskih panogah, kot so npr. proizvodnja cementa, stekla, predelava jekla, konvencionalnih elektrarnah, petrokemiji ...

Upal bi se ta izziv dvigniti celo nad izziv razpršene proizvodnje električne energije iz nekonvencionalnih elektrarn, saj so vetrne in sončne elektrarne, da ne omenjam še ostalih, že dosegle tehnični in ekonomski prag učinkovitosti, potrebna bo le še smotrna umestitev teh elektrarn v prostor in jih vključiti v t. i. pametna omrežja, ki bodo nepogrešljiv spremljevalec aktualne 4.0 industrijske revolucije.

Morda bi izkoriščanje odpadne toplote lahko primerjal z izzivom akumuliranja velikih količin električne energije ali pa pretvorbo viškov električne energije v plin (**Power to gas**, po novem t. i. **Wingas**) ali vsaj akumulacijo toplotne energije v hranilnikih proizvedeno iz viškov električne energije (**Power to heat**), kar je zagotovo tudi »vroča« tema v energetiki!

Potencial neizkoriščene industrijske odpadne toplote je ogromen. Celoten potencial je težko natančno oceniti. Znana je le groba ocena, in sicer naj bi se približno 50 % celotne energije (vključno s transportom) izgubilo v obliki nizkotemperaturne toplote. Ali pa še bolj nazoren podatek, da samo pri proizvodnji električne energije nastane toliko odpadne toplote, da bi lahko ogrevali vse objekte na evropskem kontinentu! Zato so agencije in inštituti v industrijsko razvitih državah znotraj EU pripravili nekakšne atlase (kot npr. t. i. Pan-European Thermal Atlas 4) s »črnimi« točkami, kjer se nahajajo ti potenciali, katere bo potrebno v bližnji prihodnosti tako ali drugače izkoristiti.

Poleg direktnih in indirektnih negativnih vplivov odpadne toplote na okolje pa je samo hlajenje industrijskih procesov tudi strošek, tako zaradi investicije in vzdrževanja hladilne tehnike, priprave vode ter same rabe električne energije za pogon hladilnega sistema. Vsi ti stroški, izgubljena energija in ostale težave kar same po sebi kličejo po novih tehničnih rešitvah in inovacijah.

Poznani so tudi primeri dobrih praks, kjer so odpadno toploto uspeli pretvoriti v dobičkonosen posel ali vsaj v prihranek pri strošku za energijo, bodisi s pretvorbo v električno energijo, daljinskim ogrevanjem, proizvodnjo hladu ali pa z dvigom temperaturnega nivoja s pomočjo toplotne črpalke na zeleni nivo.

Več termodinamičnih procesov nam omogoča izkoriščati odpadno toploto.

Največkrat uporabljeni so procesi kot npr. joulov, rankijev, stirlingov ... V nadaljevanju tega prispevka se bom osredotočil na stirlingov termodinamični proces in podrobneje predstavil edinstveno, visokotemperaturno industrijsko toplotno črpalko s stirlingovim procesom.

ZAKAJ EDINSTVENA TČ?

Mnogi ste že slišali za stirlingov proces/cikel, a le redkim ga je tudi uspelo videti v naravni velikosti in obratovanju, toda časi se spreminjajo. V nenehnem iskanju boljših izkoristkov, v neustavljivem napredku novih materialov postajajo marsikateri tehnični rešitve iz »naftalina« zopet zanimive.

Tako je norveškemu »start-up« podjetju Single – Phase – Power v desetletju razvoja uspelo razviti edinstveno, visokotemperaturno industrijsko toplotno črpalko s stirlingovim procesom pod trgovsko oznako SPP 4-106 HL.

Kot prvi so naredili toplotno črpalko, ki lahko s stirlingovim procesom znatno poviša (zniža) temperaturno razliko in doseže visoke temperature, vse do 230 °C in tako lahko resnično govorimo o visokotemperaturni TČ.

KAJ JE STIRLINGOV PROCES?

Kot že zgoraj omenjeno gre za termodinamični, zaprt, reverzibilni proces, ki je značilen za celotni asortima agregatov ali v obliki motorja, kriogenega generatorja ali toplotne črpalke. V obliki stirlingovega motorja je bil prestavljen že davnega leta 1816. Očetje motorja pa so bili škotski duhovnik Sir. Robert Stirling, njegov brat in prijatelj z inženirskim znanjem. Nastal je kot alternativa takratnim parnim strojem in je bil bolj varen pred eksplozijami za delo v bližini. Prvi stirlingi so imeli težave

s tesnjenjem in ker so bili železni, so bili podvrženi koroziji, saj je bil sprva delovni plin le komprimiran zrak iz okolice. Leta 1940 pa so v agregatih delovni plin – zrak, zamenjali z dušikom (kasneje še z vodikom, helijem ...), ki v principu nikoli ne zapusti motorja. Kot pogonski motor za svoje delovanje potrebuje dovolj veliko razliko v temperaturah (ΔT). Delovni plin se med delovanjem komprimira in s tem segreva ter na drugi strani ohlaja in razširja. Sestavljen je iz bistveno manj gibljivih in vrtečih se elementov kot motorji z notranjim zgorevanjem, kar v praksi pomeni nižje obratovalne stroške in večjo zanesljivost delovanja. V preteklosti se je stirlingov proces najbolj pogosto pojavljal v obliki kriogenega generatorja za proizvodnjo hladu.

Leta 1982 je prof. Ivo Kolin iz zagrebške univerze predstavil optimiran, stirlingov proces, katerega je poganjala že majhna temperaturna razlika in tako smo dobili prve primerke nizkotemperaturnih stirlingov. Sam proces delovanja se je boljše in lažje razumel šele, ko je prof. James Senft iz Wisconsin-River Falls-ove univerze predstavil model Stirlinga, ki je obratoval na impresivno majhno razliko v temperaturi, le 0,5 K!

Vsi ti poskusi in iznajdbe so tlakovali pot razvoju današnjim, industrijskim stirlingom, ki so v določenih aplikacijah nezamenljivi.

TEHNIČNI OPIS AGREGATA

V naravi to pomeni, da je SPP 4-106 - 4 valjni 90°, V agregat, križni tip z dvojno delujočimi bati.

SPP stirling je serijski, štiriciklični, Alfa tip stirlingov agregat, kjer se vsak krožni proces sestoji iz dvovaljih prostornin, t. i. kompresijske in ekspanzijske prostornine, ki pa sta povezani s tremi garniturami toplotnih izmenjevalcev: kompresijski toplotni izmenjevalec,

regenerator in ekspanzijski toplotni izmenjevalec.

Delovni plin v stirlingu je helij. Agregat ima še ločen sistem za podmazovanje in hlajenje, upravljanje in nadzor nad tlakom delovnega plina, diagnostiko ter arhiviranje alarmnih sporočil in napak.

TČ ima nominalno toplotno moč med 400 in 500 kW. Zasnovana je tako, da lahko dvigne temperaturni nivo vse do 200 °C (termično olje pa do 230 °C). TČ lahko modulira med 20 in 100 % nominalne toplote moči. Modulacija se izvaja s spreminjanjem števila obratov in tlakom delovnega plina, kar omogoča TČ, da je izredno odzivna. Ker je delovni medij znotraj TČ plin in le-ta nikoli skozi svoj proces segrevanja in ohlajanja ne spremeni agregatnega stanja, ima TČ zelo malo omejitev glede izvirne in izhodne temperature. Poleg tega proces hitro najde novo ravnotežje stanja ob velikih, nenadnih spremembah temperatur bodisi na vroči ali hladni strani, kar v praksi pomeni, da je sam proces zelo »robusten«.

OSNOVA ZA NASTANEK TČ SPP 4-106 HL

Razvoja opisane TČ so se lotili na sicer neobičajen način za razvoj stirlingovega toplotnega stroja. Kot osnovo (blok motorja, odmična gred,...) so prevzeli kar od dobrega znanega in preizkušenega ladijskega, dizelskega V motorja. Na to osnovo so nadeli bate, cilindre in regeneratorje, ki predstavljajo srce naprave in tako uspeli narediti toplotni stroj z neskončnim, zaprtim stirlingovim procesom.

Kombinacija znanja stirlingovih tehnologij in dobro poznane tehnologije velikih dizelskih motorjev so združili v novo generacijo toplotnih črpalk s trgovskim imenom SPP 4-106 HighLift.

Tehnološki napredek je izreden, saj predstavlja velik korak naprej pri TČ v primerjavi s tradicionalnimi tehnologijami. Uspeh je ob enem še ovrzel predhodna dognanja in skepticizem, kako se bo stirlingov proces obnašal pri tako visokih temperaturah.

KAKO V PRAKSI POTEKA STIRLINGOV PROCES ZNOTRAJ TČ

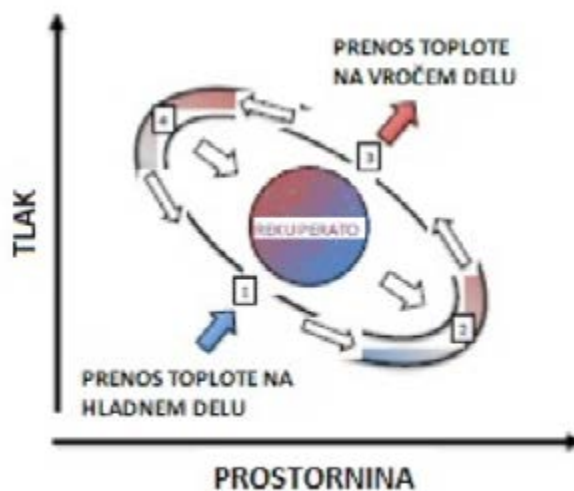
Kot že opisano, je termodinamični proces v TČ SPP 4-106 t. i. stirlingov proces. V agregatu se nahaja 2 kg delovnega plina - helij (hladilni plin R-704). Zaradi okolju prijaznega, neeksplozivnega in netoksičnega delovnega plina (Global Warming Potential enak 0) je mogoča umestitev te TČ v praktično katerikoli tehnološki proces in okolje.

Princip delovanja je sledeč. Ko je delovni plin na vroči strani agregata, je le-ta tam tudi že stisnjen in posledično tudi segret na višjo temperaturo. Toplota se na tej točki (vroča stran agregata) prenaša prek toplotnega izmenjevalnika na

medij, s katerim prenašamo proizvedeno toploto do želenega porabnika. Med tem ko se delovni plin potiska naprej proti hladni strani, le-ta odda še preostalo toploto v notranji hranilnik toplotne energije (t. i. regenerator). Ko pa je delovni plin potisnjen na hladno stran agregata, se le-ta tam razširi in ohladi. Na tej točki delovni plin prenese nase toploto iz »hladnega« medija in ga s tem še bolj ohladi (koristen hlad za hlajenje tehnoloških procesov, kompresorjev ...).

Pri potiskanju plina proti vroči strani TČ, se na tej poti plin še dodatno segreje iz akumulirane toplote, ki je bila shranjena v regeneratorju.

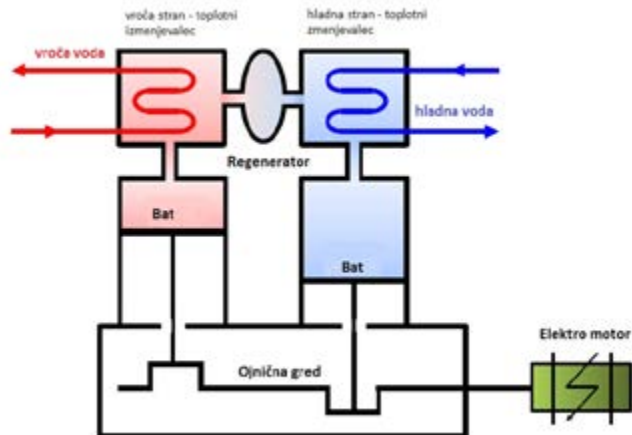
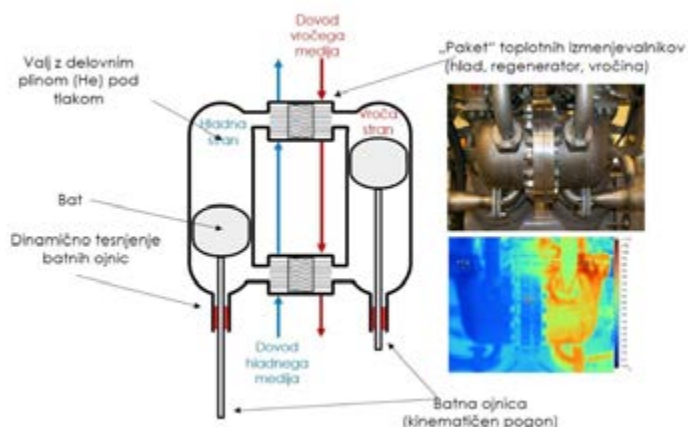
Spodnja skica prikazuje segrevanje in ohlajanje kot tudi krčenje in raztezanje delovnega plina. V realnosti ima stirlingov proces v tlačno – prostorninskem grafu eliptično obliko.



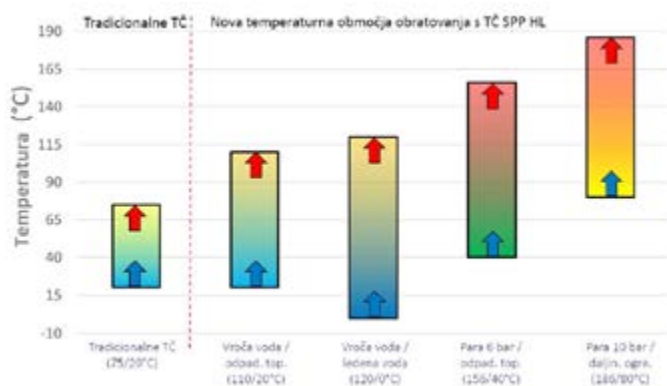
Graf 1: Prikaz termodinamičnega cikla v SPP 4-106 HL. Toplota vstopa v TČ pri nizki temperaturi in nizkem tlaku

TČ (1). Nato se na drugi strani toplota odvaja pri višji temperaturi in višjem tlaku (3). Hranilnik toplotne energije shranjuje toploto, ko je delovni plin ohlajen (4) in ga vrača nazaj v proces, ko je le-ta segret (2).

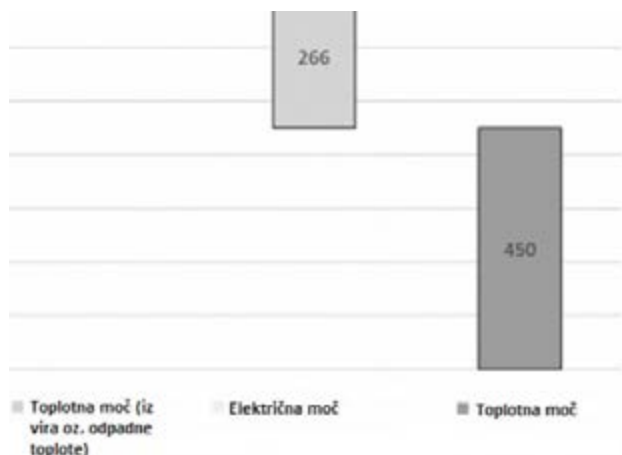
Prenos toplote od izvora hladu do toplotnega izmenjevalnika poteka, ko se delovni plin vsakokrat razširi in komprimira pri skoraj konstantni temperaturi (izotermičen proces). Prenos toplote iz ali v notranji toplotni hranilnik poteka, ko je prostornina plina približno konstantna (izohorna sprememba). Notranji toplotni hranilnik oz. t. i. regenerator je ključnega pomena za izvajanje tega procesa. Regenerator preprečuje velika temperaturna nihanja delovnega plina in znatno povečuje mehanski izkoristek naprave.



Slika 2: Shematski prikaz delovanja v Alfa konfiguracije TČ s stirlingovim procesom. Bata delujeta vzajemno v paru, tako da lahko potiskata delovni plin iz vročega dela v hladni del TČ in obratno. Batni mehanizem ekspandira delovni plin, ko je la-ta v največji meri prisoten na hladni strani TČ in ustrezno komprimira, ko je le-ta na vroči strani TČ.



Graf 2: Primerjava temperaturnih območij delovanja tradicionalnih TČ in TČ SPP 4-106 HL



Graf 3: Primer energijskih tokov pri proizvodnji 6-barske pare pri 156 °C iz odpadne toplote > 70 °C.

TEHNIČNE KARAKTERISTIKE

Tipične karakteristike

Nazivna izhodna toplotna moč	500 kW (0,8 t pare/h)
Nazivna izhodna hladilna moč	250 kW
Nazivna vhodna električna moč	250 kW
Coefficient of Performance, COP _{te} nazivni	1.5 - 3.0

Obremenitveno območje 20-100%

Območje delovanja

Max temp. (vroča stran): 195 °C

Min. temp. (mrzla stran): -5 °C

Max. pami tlak: 10 bar_g

Zagonski čas

	Hladni zagon	Topel zagon
Prilava vroče vode	<10 min	≤ 5 min
Proizvodnja pare	30-80 min	<10 min

NADALJNI RAZVOJ SPP 4-106

Logično nadaljevanje razvoja in izkoriščanja zmožnosti dane tehnologije pa je še obrnjen stirlingov proces. Torej ideja je sledeča, da je z odpadno toploto in z določenimi modifikacijami na samem agregatu naprava teoretično sposobna proizvajati električno energijo (in hlad). Razvoj poteka v smeri, da bi lahko elektrarna učinkovito obratovala že iz nizkega in srednjega temperaturnega nivoja odpadne toplote (od 70 °C do 240 °C).

Pilotna naprava s trgovskim imenom SPP 4-106 HP (High Power) že obratuje v industrijskem obratu Moelven, Norveška in dosega približno 12 % električni izkoristek.

Glede na aktualno stanje nizkih odkupnih cen električne energije se je žal razvoj do nadaljnjega zaustavil.

ZAKLJUČEK

Večina TČ SPP 4-106 je inštaliranih v skandinavskih državah, prednjači Norveška. Razlog za številčne projekte izhaja iz dejstev, da so Skandinavci na zavirljivi ravni kar se tiče okoljske ozaveščenosti, da imajo te države tudi slabšo ozemeljsko pokritost z zemeljskim plinom, razmerje cen med posameznimi energenti in električno energijo, ki je v prid slednji ter nenazadnje velik delež proizvodnje električne energije iz OVE, kar daje takšnim projektom resnično trajnostni pomen v smislu tranzicije v nizkoogljično družbo.

V Sloveniji zaenkrat ne stoji še nobena takšna TČ. Nadaljnje nove inštalacije bodo odvisne tako od razmerja cen posamičnih energentov in električne energije, morebitnih subvencij, politične volje ter samega pritiska glede zavez k zmanjševanju CO₂ odtisa in zmanjševanju rabe primarne energije.

Zanimivo je tudi dejstvo, da nekaj naprav stoji tudi že v skandinavskih kotlovnica daljinskega ogrevanja, kjer dotične TČ izkoriščajo za balansiranje omrežja v smislu izkoriščanja viška električne energije t. i. »Power to heat«, kar pomeni, da je lahko TČ tudi del pametnih omrežij, ki lahko izkoriščajo prednosti digitalizacije in ostalih spremljajočih se novih tehnologij.

REFERENČNI PRIMERI VGRADNJE SPP 4-106 HL

1. Farmaceutsko podjetje AstraZeneca, Stockholm, Švedska, izvedba v 2017

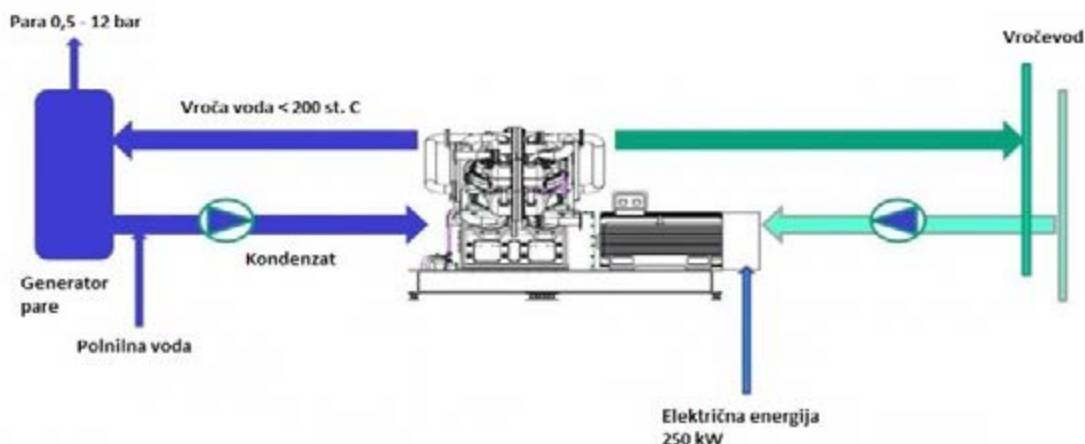
3x SPP 4-106 HL, 1,5 MW toplotne moči oz. proizvodnja pare cca. 2,4 t/uro.

Proizvodnja tehnološke pare iz vročevodnega, daljinskega ogrevanja. Gre za primer dobre prakse tako glede poslovnega modela pri proizvodnji in prodaji pare pri končnem porabniku (t.i. energetske pogodbeništvu), zadovoljstvo pri ponudniku daljinske toplote iz plinske soproizvodne naprave, saj si je tako zagotovil in povečal proizvodnjo / odjem toplote skozi celotno leto in kot omenjeno povečana poraba zemeljskega plina. Učinki se kažejo tudi pri naročniku energetskega pogodbeništvu, saj se mu je znižal strošek za porabljeno paro.



Slika 3: Zaključna faza vgradnje treh TČ SPP 4-160 v AstraZeneca, Stockholm.

Proizvodnja pare iz vročevoda

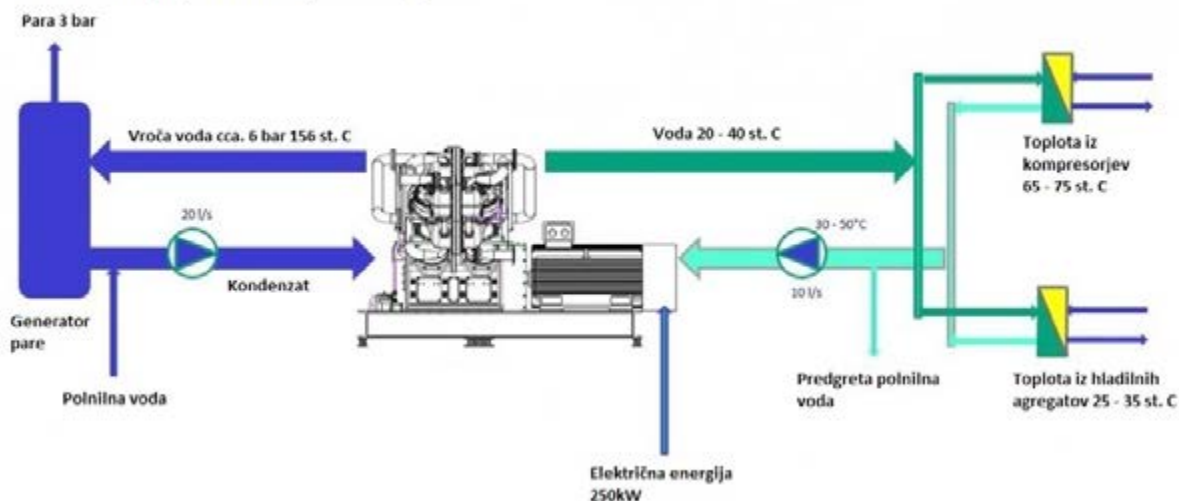


2. Prehrambeno podjetje Lerum AS, Sogndal, Norveška, izvedba v 2016

1x SPP 4-106 HL, 0,5 MW toplotne moči oz. proizvodnja pare okoli 0,8 t/uro.

Proizvodnja pare iz odpadne toplote kompresorjev in hladilnega sistema. Z umestitvijo TČ so poleg znižanja rabe energije za hlajenje dosegli še učinkovitejše hlajenje kompresorjev in hladilnega sistema. Glede na to, da se v tem primeru koristno rabi še energija hladu, se giblje povprečni COP TČ 3,0!

Proizvodnja pare iz odpadne toplote



Slika 4: Ena prvih vgradenj TČ SPP 4-160 HL, Lerum, Sogndal. Trenutno poteka vgradnja še ene TČ.

VIRI: Tehnična in propagandna dokumentacija Single – Power
-Phase AS, Norveška

SLIKE in GRAFI: Arhiv avtorja in iz tehnične ter propagandne dokumentacije Single – Power -Phase AS, Norveška

VEČ INFORMACIJ:

IMP Promont d.o.o., Ljubljana

AVTOR ČLANKA:

Matevž Čokl, inž.

E mail: matevz.cokl@imp-pro-mont.si

ŽIVLJENJEPIŠ AVTORJA

Matevž Čokl, inž.

Vodja projektov URE, OVE, SPTE

IMP Promont d.o.o., Ljubljana

E mail: matevz.cokl@imp-pro-mont.si



Matvez Čokl je diplomiral leta 1997 na Biotehniški fakulteti, oddelek za lesarstvo, Univerze v Ljubljani. Leta 2011 je svoje izkušnje s področja energetike, umeščanja in upravljanja energetskih postrojenj ter učinkovite rabe energije nadgradil še z izobraževalnim programom EUREM.

Od prve zaposlitve naprej je v različnih podjetjih deloval na področju tako ravnanja in reciklaže z odpadki, kot tudi na področju bio in alternativnih pogonskih goriv. Skozi celotno kariero je umeščal in upravljal z razpršenimi viri proizvodnje električne energije.

Več kot 15 let se že tudi aktivno ukvarja s stirlingovimi tehnologijami in le-te vključuje v projekte, kjer bi ostale tehnologije težko tekmovala z edinstvenimi lastnostmi stirlingovega procesa.

Od leta 2012 je zaposlen v podjetju IMP Promont d. o. o. in vodi projekte na področju URE, OVE in SPTE. Je velik zagovornik in promotor trajnostne energije. Svoje bogate izkušnje manifestira skozi predavanja na različnih simpozijih in delavnicah, strokovne članke ter kot aktivni član v društvih, povezanih s področji URE, OVE in SPTE.