

Sami Piskonen

Matalaenergisen lämmön hyödyntäminen sähkön tuotannossa Stirling-tekniikan avulla

Opinnäytetyö

Insinööri (AMK)

Energiatekniikka

2022



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Insinööri (AMK)
Tekijä/Tekijät	Sami Piskonen
Työn nimi	Matalaenergisen lämmön hyödyntäminen sähköntuotannossa Stirling-tekniikan avulla
Toimeksiantaja	Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Hukkaveks-hanke
Vuosi	2022
Sivut	49 sivua
Työn ohjaaja(t)	Hannu Sarvelainen, Maunu Kuosa

TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyö käsittelee Stirling-tekniikan kehitystä ja soveltuvuutta hukka- ja ylijäämälämmön hyödyntämiseen sähköntuotannossa. Työ tehtiin osana Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun tutkimus- ja kehityspuolen Hukkaveks-hanketta, jossa tutkitaan Kymenlaakson hukkalämpöpotentiaalia ja hyödyntämistä sekä teknisiä ratkaisuja. Työn tavoitteena oli tuoda hankkeelle lisäarvoa selvittämällä kaupallisia sähköntuotannon mahdollisuuksia hukkalämmöstä Stirling-tekniikalla. Tavoitteena oli myös tutkia Stirling-tekniikan kehitystä ja nykytilaa.

Työssä käytiin läpi tutkimuksia liittyen Stirling-tekniikan toimintaan, rakentamiseen ja käyttösovelluksiin. Erityisesti keskityttiin tutkimuksiin, jotka koskivat työn tavoitetta. Työssä myös selvitettiin teollisia hukka- ja ylijäämälämmönlähteitä ja niiden määriä. Työhön mallinnettiin 3D-malleja kuvailemaan Stirling-tekniikan toimintaa ja mahdollisia kytkentöjä. Lisäksi tehtiin yksinkertaisia laskelmia hyötysuhteesta, mahdollisista erilaisista virtauksista ja kannattavuudesta. Näiden osa-alueiden pohjalta analysoitiin hukka- ja ylijäämälämmön hyödyntämispotentiaalia Stirling-moottoreilla.

Työssä selvitettiin tutkimusten avulla tekniikan kehitystä ja sovelluksia hukkalämmön hyödyntämiselle. Näitä tutkimuksia on tehty maailmanlaajuisesti ja työssä ilmeni, että aiheeseen on kiinnostusta. Tutkimusten perusteella Stirling-tekniikka ei kuitenkaan vielä sovi hukkalämmön hyödyntämiseen kaupallisesti, mutta teknologiaa kehitetään edelleen. Työssä tehtyjen arvioitujen laskelmien mukaan hyödyntämispotentiaalia kuitenkin on teollisissa ympäristöissä. Hukkalämmönlähteitä on paljon ja monet ovat hyödyntämättömiä. Kuitenkin näihin kohteisiin on suunniteltu tällä hetkellä muita sovelluksia, kuten kaukolämpöä.

Asiasanat: Stirling-moottori, hukkalämpö, hyötysuhde, sähköntuotanto

Degree	Bachelor of Engineering
Author (authors)	Sami Piskonen
Thesis title	Utilization of low energy heat in electricity generation using Stirling technology
Commissioned by	South-Eastern Finland university of applied sciences Hukkaveks-project
Time	2022
Pages	49 pages
Supervisor	Hannu Sarvelainen, Maunu Kuosa

ABSTRACT

The objective of this thesis was to explore the possibilities of Stirling technology in converting waste heat into electricity commercially. The aim was also to study the current development and state of Stirling technology with respect to its operation, structure and application. The thesis also investigated the sources and quantities of industrial waste and surplus heat.

For the thesis, 3D models were made to help describe the operation of Stirling technology and possible couplings. In addition, simple calculations were made for defining efficiency, different possible flows and profitability. Based on the findings, the potential uses for the utilization of waste and surplus heat with Stirling engines was analyzed.

Based on the previous studies that were reviewed in this thesis, Stirling technology is still not suitable for the commercial use of waste heat, but the technology is constantly developed and there is worldwide interest in the matter. According to the calculations made in the thesis, there is potential for its utilization in industrial environments since there are many waste heat sources. Currently, however, considered for these sources are other applications, such as district heating.

Keywords: Stirling engine, waste heat, efficiency, electricity production

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	5
2	STIRLING-PROSESSI	5
2.1	Stirling-sykli	6
2.2	Mekaaninen toimintaperiaate	10
2.3	Rakenteelliset ominaisuudet	14
2.4	Moottorityypit	17
3	KÄYTÖSSÄ OLEVAT SOVELLUKSET JA TEKNIIKAN JOUSTAVUUS	21
3.1	Aurinkovoimaan yhdistettynä	21
3.2	Jäähdytysteknologia	22
3.3	Propulsiotekniikka	23
3.4	Kaivostekniikka	24
3.5	Lääketiede	24
4	MATALAENERGINEN LÄMPÖ	25
4.1	Ylijäämä- ja hukkalämpö teollisuudessa	25
4.2	Matalaenergisien lämmön rooli sähköntuotannossa	27
5	STIRLING-TEKNIIKAN KEHITYS JA LÄMMÖN HYÖDYNTÄMINEN	28
5.1	Kehittyvät teknologiat	28
5.2	Käytön haasteet	31
5.3	Kilpailevat tekniikat	31
6	SÄHKÖNTUOTANTO	32
6.1	Terminen hyötysuhde	32
6.2	Virtaukset	33
6.3	Kannattavuustarkastelu	36
6.4	Kytkeäntäesimerkkejä	39
6.5	Johtopäätökset sähköntuotannon kannattavuudesta	42
7	YHTEENVETO	43
	LÄHTEET	45

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tehtävänä on selvittää Stirling-tekniikan nykykehitystä ja sen soveltuvuutta sähköntuotannossa käyttäen hyväksi matalaenergisiä lämmönlähteitä, kuten teollisuuden hukkalämpövirtoja.

Työssä esitellään Stirling-tekniikan taustateoriaa, erilaisia toteutustapoja liittyen mekaaniseen rakenteeseen, käytännön sovelluksiin sekä käytettäviin energialähteisiin.

Työ tehtiin osana Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Hukkaveks-hanketta, jossa tutkitaan ja kartoitetaan hukkalämmön hyödyntämistä Kymenlaakson alueella. Hanke keskittyy lämmön hyödyntämiseen uudelleen lämpönä, joten tämän työn tavoitteena on tuoda uutta näkökulmaa hankkeeseen niin sähköntuotannon, kuin myös toisenlaisten teknisten ratkaisujen kautta.

Työssä käydään läpi tutkimuksia liittyen Stirling-tekniikan erilaisiin käyttömahdollisuuksiin ja teknisiin ratkaisuihin, sen soveltuvuutta matalaenergisen lämmön hyödyntämiseen ja sähköntuotantoon. Myös tutkimuksia liittyen hukka- ja ylijäämälämmön lähteisiin ja niiden määrään ja nykyiseen hyödyntämiseen on tutkittu. Työtä varten on tehty 3D-mallinnuksia erilaisista moottorityypeistä, moottorin toiminnasta ja mahdollisista kytkentäkonsepteista. Työssä on laskettu moottorin termistä hyötysuhdetta eri lämpötilatasoilla, tarvittavia virtauksia käytölle sekä tarkasteltu sähköntuotannon kannattavuutta takaisinmaksuaikojen kautta käyttäen muuttujina käyttötunteja ja sähkön hintoja. Näiden seikkojen avulla pyritään analysoimaan, onko mahdollista hyödyntää Stirling-tekniikkaa sähköntuotannossa käyttäen teollisia lämmön ylijäämä- ja hukkavirtoja.

2 STIRLING-PROSESSI

Stirling-tekniikka on yli 200 vuotta vanhaa. Robert Stirling patentoi keksintönsä vuonna 1816 ja patenttiin kuului myös mukaan ”ekonomaiseri” eli regeneraattori. Hän kehitti laitteen alun perin turvallisemmaksi vaihtoehdoksi ajan höyrykoneille, jotka eivät rakenteellisesti kestäneet käyttöpaineita ja räjähtelivät vaarantaen niiden kanssa työskentelevien terveyttä ja henkeä. Robertin veli

James Stirling kehitti koneistoa eteenpäin valmistamalla ison koneiston kaksitoimisella männällä ja kahdella lämmitys- ja syrjäytysosalla. Kun teräksen massavalmistusta alkoi ja höyrykoneet muuttuivat turvallisemmiksi, Stirling-tekniikan kiinnostavuus ja käyttö hiipui. (Stirling International 2021.)

Kuvassa 1 näkyy Philipsin Stirling-moottori, joka tuotti 0,3 kW tehoa ja jonka kierrosluku oli 1500 rpm. Tämänkaltaisia moottoreita kehitettiin jo toisen maailmansodan aikana.



Kuva 1. Philipsin Stirling-moottori vuodelta 1952 (Stirling International 2022)

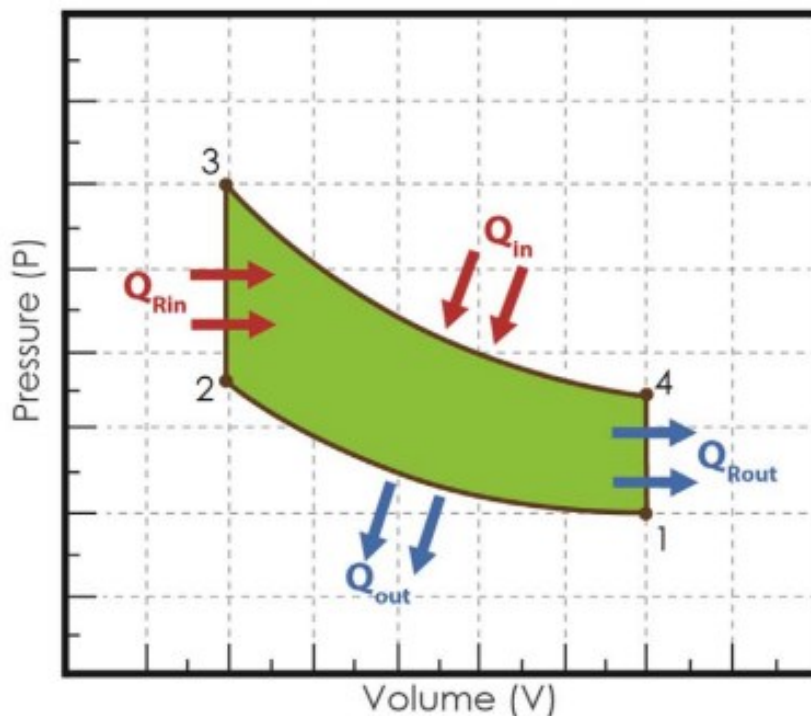
Philipsin tutkimuslaboratorio Eindhovenissa kävi uudestaan tutkimaan tekniikkaa 1930-luvulla erityisesti tapauksissa, jossa tarvittiin pienimuotoista ja hiljaista sähköntuotantoa paikkoihin, joissa tavallinen energiantuotanto ei onnistunut. Nykyaikana kiinnostus ja tutkimus on edelleen kasvanut, suurelta osin uusiutuvien energiamuotojen ja vähäpäästöisyyden yleistyessä. (Stirling International 2021.)

2.1 Stirling-sykli

Stirling-moottori on lämpövoimakone, jonka kiertoprosessi on suljettu ja yksifaasinen ja se perustuu lämpötilaeron aiheuttamaan mekaaniseen työhön. Lämmönvaihtelu kuumen ja kylmän pään välillä aiheuttaa painenvaihtelua työaineessa, usein jokin kaasu tai ilma joka pysyy yhdessä olomuodossa. Yleisesti otaksutaan, että kaasu puristuu kylmässä päässä ja paisuu lämpimässä ja painetasot pysyvät vakioina. Työaineen liikkuminen järjestelmässä

hoidetaan ilman venttiileitä tai pumppua ja hyötysuhdetta parantaa työaineen väliaikaisena lämpövarastona toimiva regeneraattori, joka on osa työaineen kiertoa. (Martini 1983, 6.)

Teoreettinen Stirling-sykli sisältää 4 vaihetta, jotka ovat isoterminen puristus, isokoorinen regeneraatio, isoterminen paisunta ja toinen isokoorinen regeneraatio. Isotermisissä vaiheissa työaineen ja lämmönlähteen tai lämpönielun välisen lämmönsiirron aikana lämpötilan ei ajatella muuttuvan ja isokooriset vaiheet tapahtuvat tasaisessa tilavuudessa. (Boles & Çengel 2015, 503.) Nämä vaiheet ovat kuvattu kuvassa 2, jossa vaiheissa 1–2 tapahtuu isoterminen puristus sekä lämmönpoistuminen järjestelmästä lämpönieluun. Vaiheissa 2–3 regeneraattori luovuttaa varastoitunutta lämpöä kuumalle puolelle isokoorisesti eli tilavuus ei muutu. Vaiheissa 3–4 tapahtuu isoterminen paisunta sekä lämpöenergian siirtyminen järjestelmään ulkoisesta lähteestä. Vaiheissa 4–1 regeneraattori varastoi kuuman puolen lämpöä ja tila pysyy isokoorisena.



Kuva 2. Teoreettinen Stirling-sykli regeneraattorilla. (Erol ym. 2017, 3)

Isotermisissä vaiheissa tapahtuvat lämpöenergian muutokset voidaan määrittää yhtälöstä 1.

$$Q = \frac{m}{M} RT_c \ln \frac{P_1}{P_2} \quad (1)$$

jossa	Q	lämpöenergia	[J]
	m	aineen massa	[g]
	M	aineen moolimassa	[g/mol]
	R	moolinen kaasuvakio	[J/molK]
	T _c	vakio­lämpötila	[K]
	P ₁	lähtöpaine	[Pa]
	P ₂	loppupaineaine	[Pa]

Isotermi­nen tilavuudenmuutos määritetään yhtälöstä 2.

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad (2)$$

jossa	P ₁	lähtöpaine	[Pa]
	V ₁	lähtötilavuus	[m ³]
	P ₂	loppupaine	[Pa]
	V ₂	lopputilavuus	[m ³]

Työ­aineen tekemä tilavuudenmuutostyö ja tekninen työ isotermisessä vaiheessa määritetään yhtälöstä 3.

$$W = -Q \quad (3)$$

jossa	W	työ	[J]
	-Q	lämpöenergia	[J]

Isokoorisessa vaiheessa tuotu lämpöenergia määritetään yhtälöstä 4.

$$Q = mc_v(T_2 - T_1) \quad (4)$$

jossa	Q	lämpöenergia	[J]
	m	massa	[kg]
	c _v	lämpö­kapasiteetti	
		vakio­tilavuudessa	[J/kg·K]
	T ₂	loppulämpötila	[K]
	T ₁	lähtö­lämpötila	[K]

Isokoorinen tilavudenmuutos lasketaan yhtälöllä 5.

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \quad (5)$$

jossa	P_1	lähtöpaine	[Pa]
	T_1	lähtölämpötila	[K]
	P_2	loppupaine	[Pa]
	T_2	loppulämpötila	[K]

Isokoorisessa vaiheessa ei tapahdu tilavuudenmuutostyötä. Tekninen työ voidaan määrittää yhtälöstä 6.

$$W = V_c(P_2 - P_1) \quad (6)$$

jossa	W	työ	[J]
	V_c	vakiotilavuus	[m ³]
	P_2	loppupaine	[Pa]
	P_1	lähtöpaine	[Pa]

Stirling-sykli on Carnot'n periaatteiden mukaan täysin käännettävissä. Sykliä terminen hyötysuhde on myös sama, kun operoidaan samoilla lämpötilasoilla. (Boles & Çengel 2015, 504–505.)

Syklin terminen hyötysuhde voidaan määrittää yhtälöstä 7.

$$\eta_{stirling} = \frac{W_n}{Q_{in}} = \frac{T_H - T_L}{T_H} \quad (7)$$

jossa	$\eta_{stirling}$	terminen hyötysuhde	[-]
	W_n	nettotyö	[J]
	Q_{in}	tuotu lämpöenergia	[J]
	T_H	kuuma lämpötila	[K]
	T_L	kylmä lämpötila	[K]

Luonnollisesti mikään prosessi ei käytännössä näin toimi, vaan järjestelmässä on häviöitä. Organ (2014, 21) mainitsee yleisinä moottoreiden sisäisinä häviönä lämmönsiirron puutteellisuuden, entalpiavuon, pumppaushäviöt, viskooisin hajoamisen, mekaanisen kitkan, lämmön johtumisen, adiabaattisen häviön ja sukkulointihäviöt.

Sukkulointihäviöillä tarkoitetaan lämmön johtumista kuuman sylinterin seinästä mäntään sen liikkua kohti sylinterin päätyä, koska männän lämpötila ei vastaa sylinterin päädyssä olevaa lämpötilaa. Nämä häviöt ovat merkittäviä ominaisuuksia Stirling-moottoreissa. (Bumataria & Patel 2013, 7.)

Koska Stirling-syklissä tapahtuu lämmönsiirtoa differentiaalisissa lämpötilaeroissa kaikissa sen komponenteissa, ideaalisykli vaatisi äärettömän suuren pinta-alan tai äärettömästi aikaa lämmönsiirtoprosesseille. Tämä ei tapahdu ja käytännössä lämmönsiirto tapahtuu tietyn lämpötilaeron yli, regeneraattorin hyötysuhde ei ole 100 % ja painehäviöt regeneraattorissa ovat mittavia. (Boles & Çengel 2015, 505–506.)

2.2 Mekaaninen toimintaperiaate

Stirling-moottoreita on paljon erilaisia. Toimintaperiaate on kuitenkin kaikissa melko samanlainen. Lämpöä siirretään jostakin tietystä lämmönlähteestä työaineeseen, joka paisuu ja puristuu syklisesti liikkeessaan kylmän ja kuuman

moottorin osioiden välillä. Tästä syntyy moottorin teho, jonka hyödynnettäväksi tarvitaan myös käyttömekanismi. Moottori tarvitsee myös tehonsäätöä, tiivisteitä eristämään työaine ympäristöstä ja sopivan lämpönielun. Moottoreissa, joissa on erillinen syrjäyttäjämäntä ja työmäntä, syrjäyttäjä suorittaa työaineen virtauksen kylmästä kuumaan osaan ja työmäntä suorittaa paisunnan ja puristuksen. (Martini 1983, 7–8.)

Organin (2007, 252) mukaan yhden sylinterin järjestelmät syrjäyttäjällä ja työmännällä minimoivat haitalliset tilat maksimoiden puristussuhteen ja termodynaamisen työn työaineen massayksikköä kohden. Ongelmana kuitenkin on termodynaamisen työn muuttaminen mekaaniseksi työksi lähtöakselilla.

Virtaus moottorin sisällä kuuman ja kylmän pään välillä muuttaa suuntaansa jatkuvasti. Laminaarista, muuttuvaa ja turbulenttista virtausta voidaan havaita kierron aikana. Oskilloiva virtaus muuttuu sinimuotoisesti männän kampikulman funktiona. (Kuosa ym. 2012, 2–3.)

Työaineina voi toimia useanlaiset kaasut, kuten vety, helium, typpi, argon, hiilidioksidi tai tavallinen ilma. Jossain työaineissa, kuten vedyssä, on räjähdysvaara. Korkean hyötysuhteen aikaansaamiseksi työaineella tulisi olla korkea lämmönjohtavuus, korkea ominaislämpö, pieni tiheys ja pieni viskositeetti. (Erol 2017, 7–8.) Vety myös haurastuttaa jotain metalleja ja heliumin lisäksi vuotavat herkimmin (Smith ym. 2016, 3).

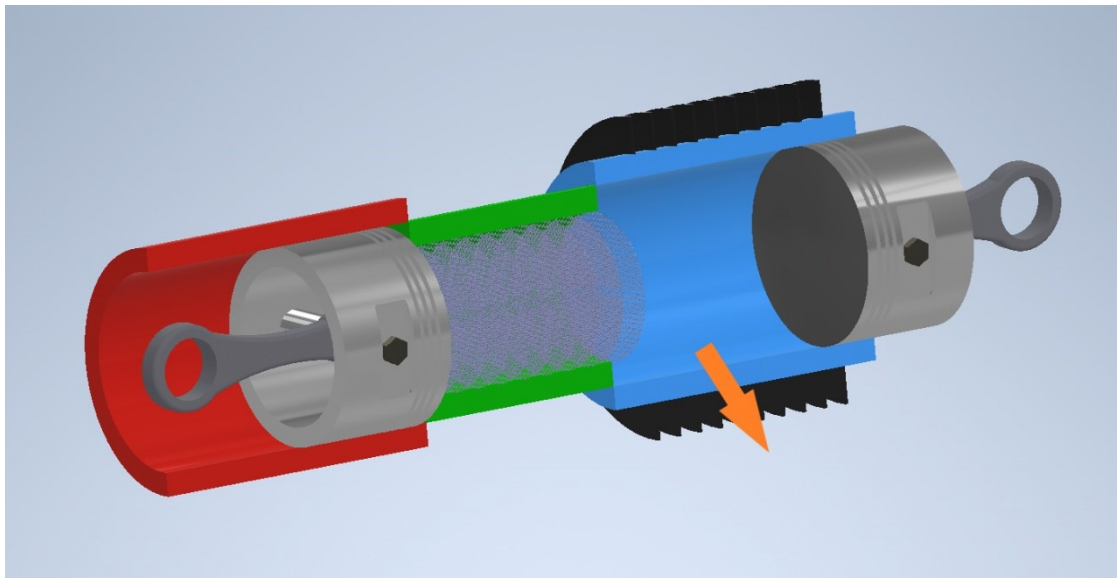
Polttoaineina ja lämmönlähteinä on käytetty monia aineita, kuten aurinkovoimaa, geotermistä energiaa, maakaasua, biomassaa, hukkalämpöä, puuta, hiiltä ja muita fossiilisia polttoaineita (Erol ym. 2017, 7).

Palamisen tapahtuessa sylintereiden ulkopuolella, toisin kuin esimerkiksi Otto- ja Diesel-moottoreissa, antaa useita etuja, kuten monen erilaisen polttoaineen käytön ja enemmän aikaa polttotapahtumalle. Tämä johtaa täydellisempään palamiseen, mikä taas johtaa pienempiin päästöihin sekä vapauttaa enemmän lämpöenergiaa prosessille. (Boles & Çengel 2015, 506.)

Organin (2007, 15) mukaan Stirling-moottorin palotapahtuman tulisi olla eristetty samaan tapaan kuin polttomoottoreissa, jotta se voisi kilpailla niiden kanssa ja ilman esilämmittimen tulisi ympäröidä polttokammio.

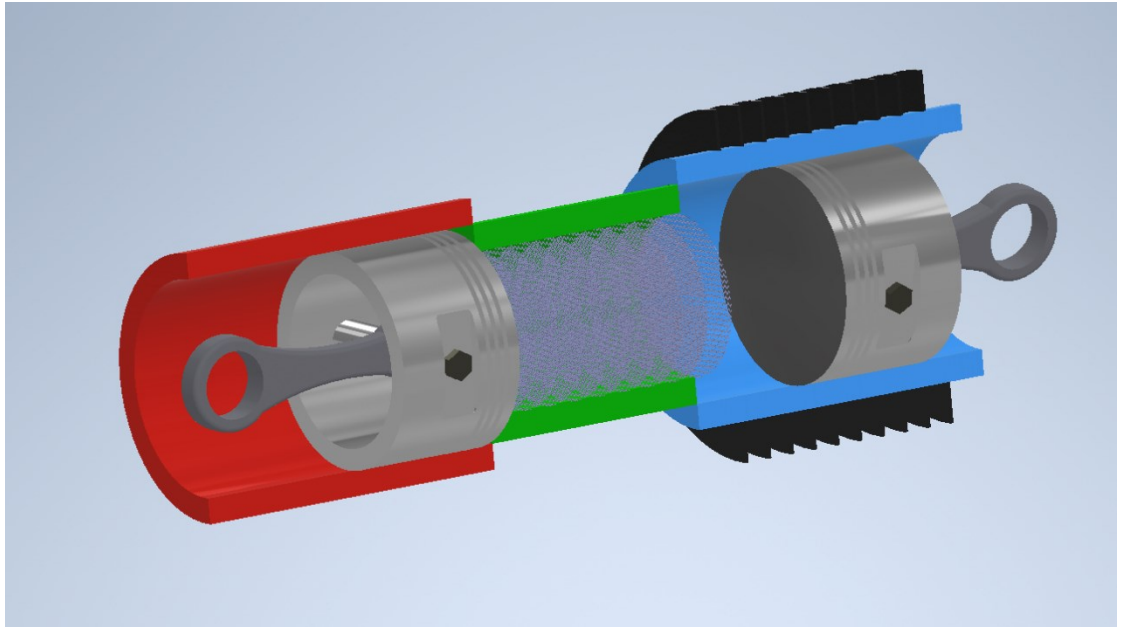
Kuvissa 3–6 on kuvattu Stirling-moottorin toimintaa yksinkertaisella mallilla. Tämän luvun kaikki 3D-mallit ovat tehty tätä työtä varten. Sininen sylinteri kuvaa kylmää päätä, jossa on jäähdytyslementtejä ja punainen kuumaa, jota ulkoisesti lämmitetään. Keskellä vihreällä on kuvattu regeneraattori, johon on mallinnettu verkkomaisia rakenteita kerroksittain kuvaamaan sen mahdollista mekaanista rakennetta.

Kuvassa 3 työaine on puristuksessa ja matalimmassa lämpötilassa männän ollessa kylmän sylinterin ääripäässä. Lämpöä poistuu järjestelmästä lämmönsiirtimien kautta lämpönieluun.



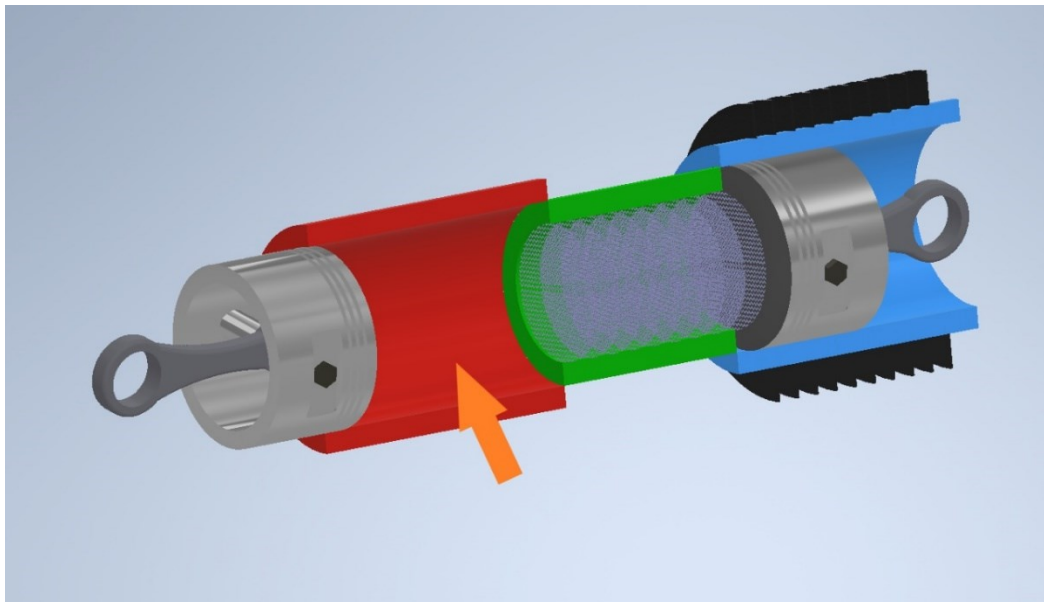
Kuva 3. Stirling-moottorin mekaaninen toiminta. Isoterminen puristus.

Kuvassa 4 männät liikkuvat sylintereissä samanaikaisesti kohti kuumaa sylinteriä pitäen työaineen tilavuuden vakiona. Työaineen virratessa kuumalle puolelle liikuttaen mäntää, regeneraattori luovuttaa aineeseen aiemmin varastoitunutta lämpöenergiaa.



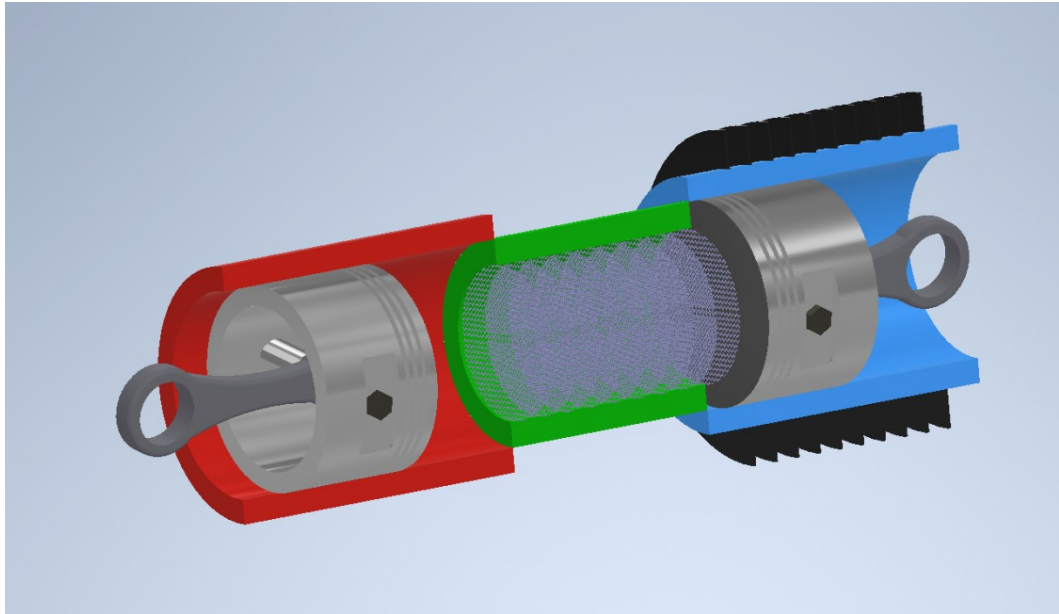
Kuva 4. Stirling-moottorin mekaaninen toiminta. Isokoorinen regeneraatio.

Kuvassa 5 männän ollessa kuuman sylinterin päässä työaine paisuu ja järjestelmään tuodaan lisää lämpöenergiaa ulkoisesta lähteestä. Vaihe tapahtuu isotermisesti.



Kuva 5. Stirling-moottorin mekaaninen toiminta. Isotermisen paisunta.

Kuvassa 6 männät liikkuvat samanaikaisesti kohti kylmää sylinteriä tilavuuden pysyen vakiona eli vaihe tapahtuu isokoorisesti. Työaineen virratessa regeneraattorin lävitse, se luovuttaa regeneraattoriin osan lämpöenergiasta. Tämän vaiheen jälkeen sykli alkaa uudelleen.



Kuva 6. Stirling moottorin mekaaninen toiminta. Isokoorinen regeneraatio 2.

Organin (2007, 179) mukaan kaasun suuntaaminen sylintereissä johtuu positiivisesta siirtymästä kahden tilavuudeltaan vaihtelevan tilan välillä suurelta osin siksi, että virtausvastus aiheuttaa epätasaisuutta paineen jakautumisessa, mikä johtaa tiheyden ja massa epätasaisuuteen. Mäntämoottoreissa, kuten Stirling-moottoreissa, paineaallot ovat reaktio kiihtyvyyteen. Kierrosnopeuden nostaminen nostaa mäntien kiihtyvyyttä, joka muuttaa painehäiriöiden vaihetta suhteessa kampiakselin kulma-asentoon ja nostaa niiden amplitudia.

Carlsen (2005, 39) mainitsee, että käytännön kierto Stirling-moottoreissa painesunnan ja puristuksen osalta muistattaa enemmän adiabaattista prosessia. Kierron hyötysuhde olisi siis riippuvainen paitsi lämpötilasuhteesta, myös paineen- ja ominaislämmönsuhteesta. Lämpötilasuhte eli -ero nostaa hyötysuhdetta, kun taas painesuhde ja ominaislämmönsuhde laskevat sitä. Moottorin spesifinen teho on lämpötila- ja painesuhteen funktio, eli lämpötilasuhteen nousu nostaa spesifistä tehoa ja näin myös painesuhteen nosto. Optimaalinen puristussuhde on tällöin kompromissi hyötysuhteen ja spesifisen tehon välillä.

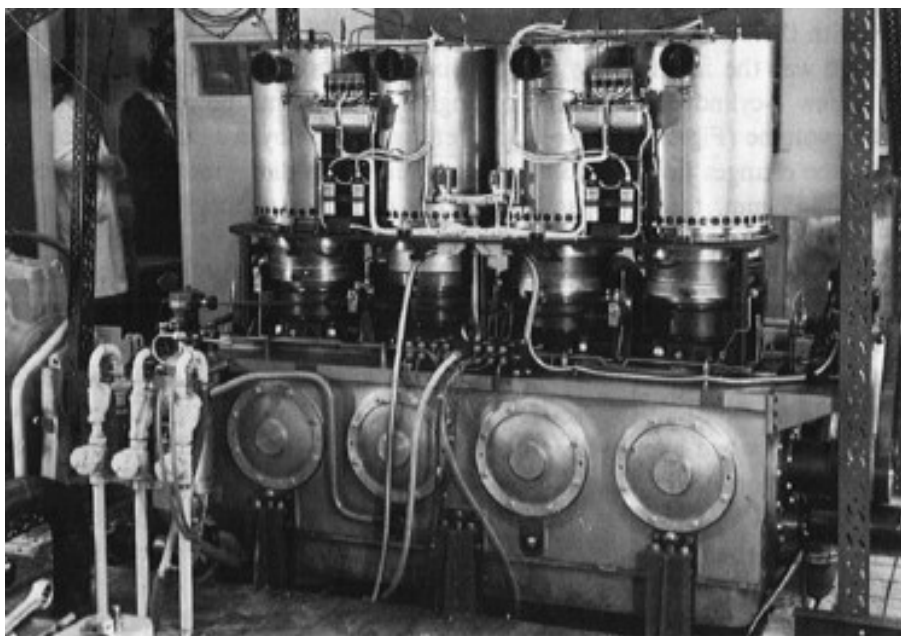
2.3 Rakenteelliset ominaisuudet

Stirling-moottoreissa olevan mahdollisen korkean paineen takia voidaan joutua käyttämään painelaiteterästä. Räjähdyksvaaran takia painelaiteteräksien raaka-aineet testataan tarkasti ja niihin liittyy valvontatoimenpiteitä, eli niiden valmistus edellyttää viranomaisen hyväksymistä, valmistuksen yhteydessä

tehdään tarkempi testaus ja laskentalujuusarvot taataan myös korotetuissa lämpötiloissa. Painelaiteteräksiä valmistetaan tietyille käyttölämpötiloille. (Leppola & Makkonen 2009, 176.)

Kampiakseli tulee olla karkaistua terästä, jotta saadaan riittävää kulumisen-kestoja. Jossain tapauksissa pultattu kaksiosainen rakenne matalahiilisestä teräksestä toimii paremmin. (Organ 2007, 243.)

Kuvassa 7 on vanha Philipsin Stirling-moottori rombikäyttömekanismilla. Kuvasta voidaan päätellä, että moottorit ovat suhteellisen painavia ja isoja suhteessa tehoonsa.



Kuva 7. Philipsin 360–15 Stirling-moottori rombikäytöllä. (Erol ym. 2017)

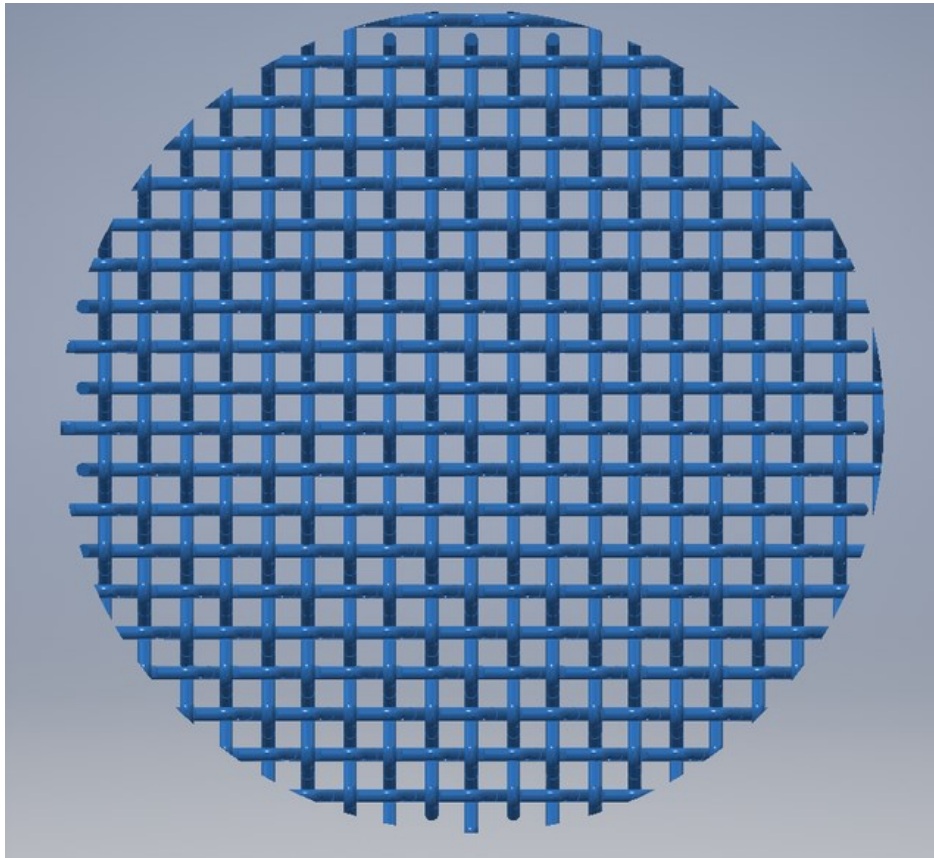
Kuosa ym. (2006, 6) totesivat, että lämmönsiirtimien likaantuminen vaikuttaa suuresti Stirling-moottorin toimintaan. Lämmönsiirtimien likaantuminen ja puhtaus aiheuttavat kustannuksia. Moottori on pysäytettävä puhtauksen ajaksi ja sen käytölle voi silti olla tarvetta puhtauksen aikana. Optimaalinen huoltoväli on hyvä selvittää kustannusten vähentämiseksi.

Regeneraattori on ominainen osa Stirling-moottoria. Se voi olla verkkomainen punos materiaalia, jota on ladeltu kerroksittain sylinterin sisään tai se voi olla huokoisesta materiaalista tehty tulppamainen rakenne, jolla on korkea termi-

nen massa. (Boles & Çengel 2015, 504). Regeneraattorin matriisiksi käy vaikkapa metallikuulat, koska kuulien koskettaessa toisiaan sisuksen lämmönjohtavuus on huono, mutta lämmön siirtyminen ilmasta kuuliin on tehokasta työaineen virratessa sylinteriin (Hemilä & Utriainen 1989, 86).

Regeneraattorin tehtävänä on toimia väliaikaisena lämpövarastona eli se varastoi ja luovuttaa lämpöä työaineesta sen virratessa kuuman ja kylmän tilan välillä. Tämä nostaa hyötysuhdetta, koska se vähentää lämmönsiirtimiltä tulevaa lämmön tarvetta. Regeneraattoria pidetään merkittävänä keksintönä ja sitä käytetään nykyään myös muissa laitteissa. (Sedlák ym. 2017, 2.)

Kuvassa 8 on mallinnettu regeneraattorin punosmaista rakennetta. Kuvan mallisia punoksia, jotka voivat olla tehty esimerkiksi metallilangasta, voidaan kasata esimerkiksi pyöreään regeneraattoriin kerroksittain ja työaine virtaa solmukohtien välistä. Materiaalina voi olla ruostumaton teräs. Verkkomaisen kerrosrakenteen sijaan voidaan käyttää esimerkiksi metallivaahdosta tehtyä tulppaa.



Kuva 8. 3D-malli regeneraattorin verkkomaisesta matriisistä.

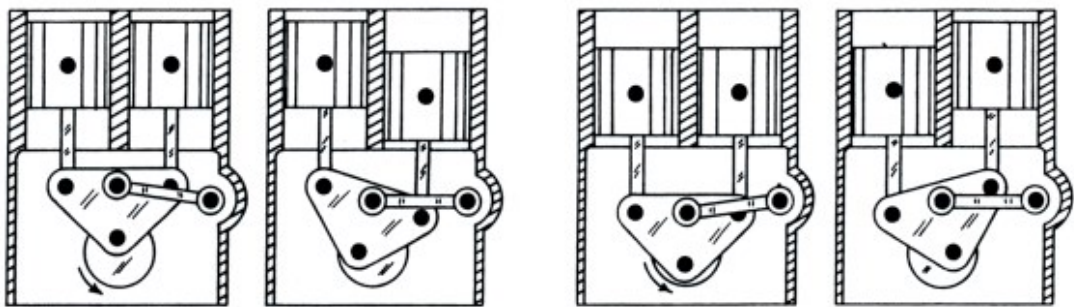
Vaikka regeneraattorin käyttäminen on lähes välttämätöntä Stirling-mootto-reissa ja ne parantavat hyötysuhdetta, lisäävät ne haitallista tilaa ja vaativat tarkkaa suunnittelua. Tämä lisää kustannuksia (Erol ym. 2017, 24.)

Käytettäessä kiinteitä polttoaineita, kuten biomassaa, täytyy lämmittimen lämmönsiirtokapasiteetti olla mahdollisimman korkea ja haitallisiin tiloihin ei saa olla vaikutusta. Haitalliset tilat koostuvat lämmönsiirtimien sisäisistä tiloista, regeneraattorin huokoisista tilavuuksista ja yhdistävistä kanavista. Mitä pienemmät haitalliset tilat ovat, sitä suurempi on spesifinen teho eli teho voidaan määrittää mäntien syrjäyttämästä tilavuudesta. (Kuosa ym. 2005, 135–136.)

2.4 Moottorityypit

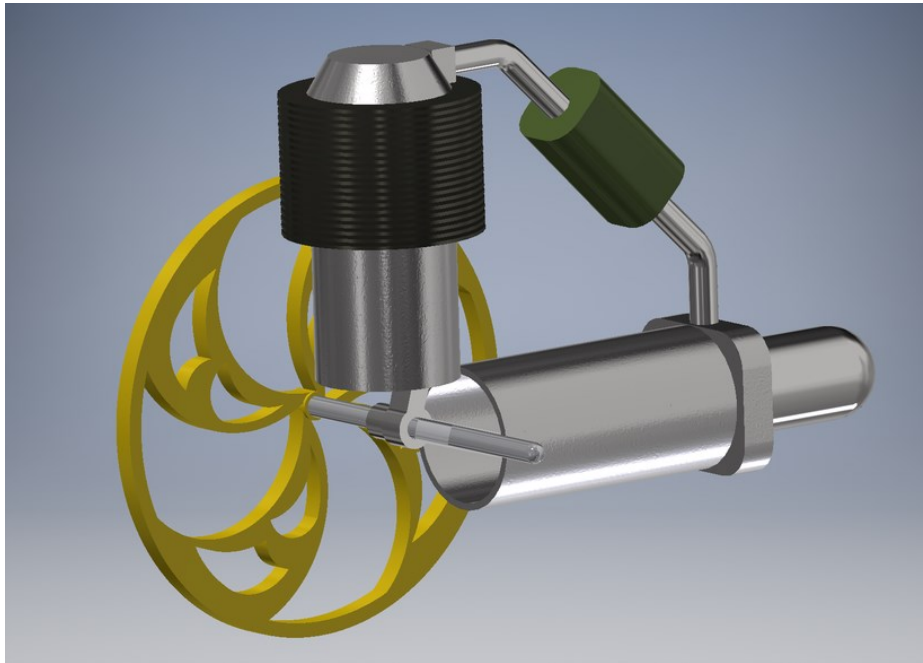
Alfa-tyypin moottori

Alfa-tyypin moottorissa on erikseen kytkettynä sarjassa kylmä ja kuuma sylinteri sekä regeneraattori niiden välissä. Alfa-tyypin moottori on konseptuaalisesti yksinkertaisin moottorityyppi, mutta siinä on haittapuolia. Männissä on oltava hyvät tiivisteet, jotta työaine pysyy sylintereissä. Alfa-tyypille on kehitetty useita käyttömekanismeja, kuten kuvassa 9 esitelty kolmiomainen yhdellä kampitapilla ja vivulla toimiva Ross yoke - ja Rocker-V-mekanismit. Alfa-mootto-reita voidaan myös järjestää monisylinterisiksi kokonaisuuksiksi, jossa yhden sylinterin paisuntatila on regeneraattorin kautta yhteydessä seuraavan sylinterin puristusosaan. Näillä konfiguraatiolla voidaan saada aikaan korkeita tehoja. (Urieli 2020.)



Kuva 9. Alfa-moottorin Ross yoke-mekanismi. (Ross 1997, 24)

Kuvassa 10 on 3D-mallintamalla esitelty Alfa-moottorin rakennetta yksinkertaisesti. Kylmään sylinteriin on kuvattu mustalla jäähdytinelementtejä ja alempana olevassa sylinterissä on erillinen osa päässä mahdolliselle lämmitykselle. Näiden välissä on vihreällä kuvattu regeneraattoriosa. Sylinterit ovat järjestetty yleiseen V-malliin. Näiden sylintereiden mäntien kiertokanget ovat kytkettynä kampiakseliin keskellä, jotta ne pyörittäisivät keltaisella kuvattua vauhtipyörää.



Kuva 10. 3D-malli alfa-tyypin moottorista.

Tutkimusten mukaan mäntien vastavuoroisen liikkeen optimointi mahdollisimman harmoniseksi eli siniaaltomaiseksi voi nostaa alfa-tyypin moottorin tehoa jopa 50 %. Tämä optimointi nostaa paineenvaihtelua, jolloin moottorin toiminta muistuttaa enemmän ideaalia Stirling-sykliä. (Masser ym. 2020, 15–16.)

Alfa-moottorissa puristuksen ja paisunnan sykli edeltää kylmän männän liikettä puolet vaihe-erosta ja toistuu kuumen männän liikkeen perässä saman verran, minkä takia suurin osa työaineesta on kuumassa sylinterissä paisunnan aikana ja kylmässä sylinterissä puristuksen aikana (Ross 1993, 8)

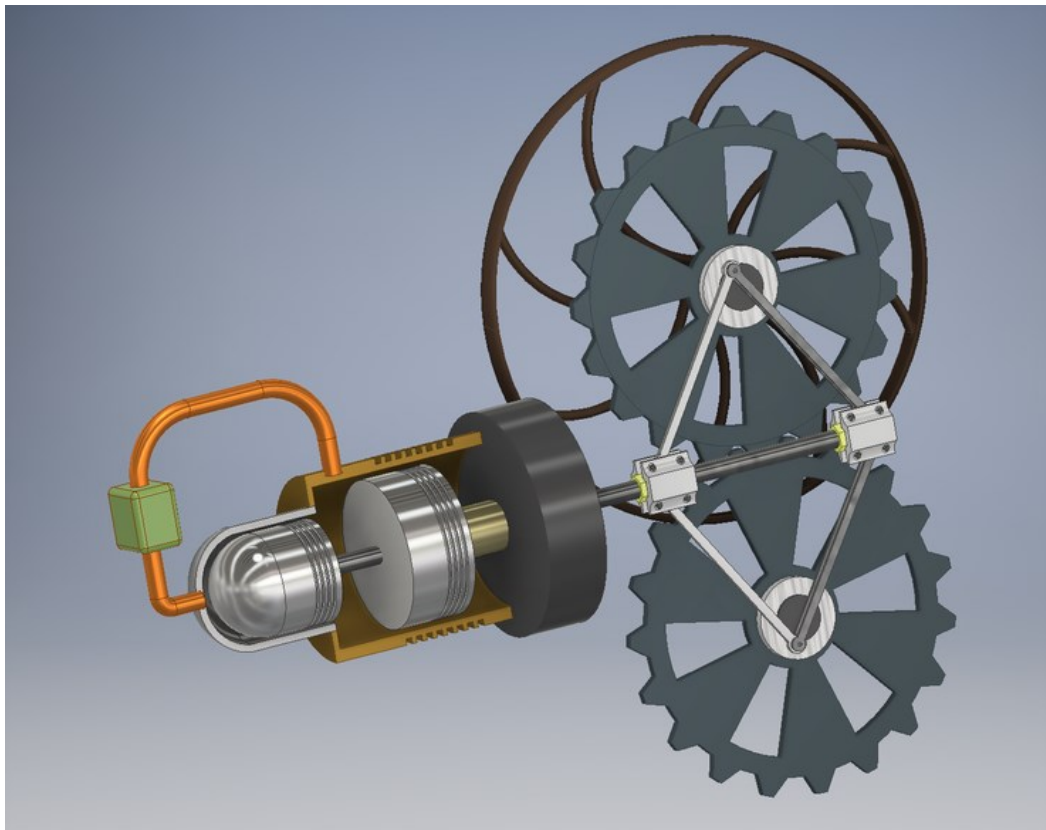
Beta-tyypin moottori

Beta-tyypin moottorissa kylmä ja kuuma tilavuus on jaettu samaan sylinteriin. Männistä käytetään kirjallisuudessa termejä syrjäyttäjämäntä (displacer) ja

voima- tai työmäntä (power piston). Nämä männät ovat järjestetty sylinterissä linjakkain. Syrjäyttäjämännän tehtävänä olisi ideaalisesti syrjäyttää työainetta vakiotilavuudessa kuuman paisuntatilan ja kylmän puristustilan välillä. (Urieli 2020.)

Koska syrjäyttäjä- ja työmäntä on sijoitettu konsentrisesti, tarvitaan käyttötanko kulkemaan syrjäyttäjästä työmännän läpi. Tätä voidaan pitää hienovaraaisena, mutta merkittävänä mekaanisena haittana. Syrjäyttäjän ja työmännän läheisyys kuitenkin mahdollistaa suuremman puristuksen ja pienemmät haitalliset tilat. Tämä tarkoittaa suurempaa hyötysuhdetta ja tehoa. (Ross 1993, 7.)

Kuvassa 11 on mallinnettu beta-tyyppin Stirling-moottori. Lämmitinosa on edessä ja regeneraattori on kuvattu vihreällä laatikolla. Tähän malliin on kuvattu beta-moottoreissa yleinen rombikäyttömekanismi hammaspyörillä ja vauhtipyörällä. Asetuksena on se, että vastavuoroinen liike liikuttaisi nivellettyä mekanismia, joka vuorostaan liikuttaisi hammaspyöriä ja vauhtipyörää.



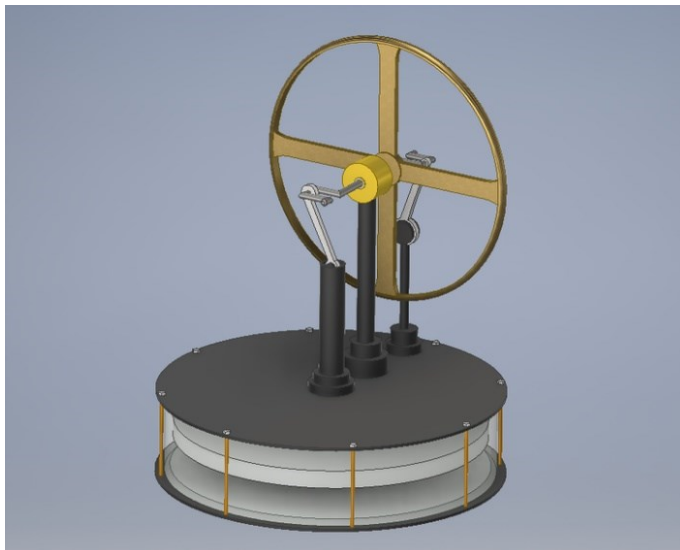
Kuva 11. 3D-malli beta-tyyppin moottorista.

Beta-tyyppin moottoreihin on kehitetty erilaisia käyttömekanismeja, kuten wobble plate-, slider crank-, ja scotch yoke-mekanismit. Tunnetuin ja käytetyin lieinee niin sanottu rhombic drive eli rombikäyttö. Sillä voidaan minimoida hyötysuhteen lasku kitkahäviöiden ja mekaanisten häviöiden suhteen. Se koostuu tangosta, johon on liitetty 2 synkronoitua ratasta, jotka pyörivät vastakkaisiin suuntiin ja tasapainossa pyörivä kampiakseli. (Erol ym. 2017, 10–14.)

Gamma-tyyppin moottori

Gamma-tyyppin Stirling-moottorissa on syrjäyttäjä- ja työmäntä kuten beta-moottorissa, mutta ne ovat eri sylintereissä. Tämä tarkoittaa, että syrjäyttäjämäntä liikuttaa kylmää ja kuumaa työainetta ja työmäntä tekee puristus- ja paisuntatyötä. Tämän takia tässä konfiguraatiossa on yleensä enemmän haitallista tilaa kuin alfa- ja beta-moottoreissa. Tämän takia syrjäyttäjä- ja työmännän koko voi vaihdella ja yleensä syrjäyttäjämäntä on suurempi. Gamma-moottoreita pidetään pienen lämpötiladifferentiaalin moottoreina ja esimerkiksi James Senft on suunnitellut pienoismallin, joka hänen mukaansa voi käydä jopa 4 C° lämpötilaerolla. (Urieli 2020.)

Kuvaan 12 on mallinnettu Gamma-tyyppin moottori vauhtipyörällä ja kampiakselilla. Syrjäyttäjämäntä on kuvattuna mustan lämmönsiirrinlevyn alla. Työmäntä on omassa takana olevassa sylinterissään. Tämän mallinen moottori voisi olla vaikka pienoismalli, joka toimisi esimerkiksi käden ja huoneen lämpötilaerolla.



Kuva 12. 3D-malli gamma-tyyppin Stirling-moottorista.

Erilliset sylinterit syrjäyttäjä- ja työmännälle minimoivat työaineen tiivistetarvetta. Näitä moottoreita voidaan rakentaa hyvin yksinkertaisista materiaaleista, mutta se sopivat vain pienille tehoille toistaiseksi, noin 100–500 W. Gamma-tyypin moottorin erikoisuutena työmännän sylinteri sijaitsee yleensä kylmällä puolella. (Sedlák, ym. 2017, 3-4.) Gamma-moottoreissa, missä regeneraattori sijaitsee syrjäyttäjässä, kutsutaan joskus Laubereau Schwarzkopf-moottoreiksi ja ulkoisella regeneraattorilla varustettua Heinrici-moottoriksi (Erol ym. 2017, 10).

3 KÄYTÖSSÄ OLEVAT SOVELLUKSET JA TEKNIIKAN JOUSTAVUUS

Tässä luvussa esitellään kaupallisia ja kokeellisia sovelluksia Stirling-moottoreille. Tarkoituksena on esitellä teknologian joustavuutta sekä sopivuutta erilaisissa käyttökohteissa. Nämä esimerkit sivuavat työn aihetta, mutta ne demonstroivat tekniikan muuntautuvuutta, joka voi olla hyödyksi myös mietittäessä matalaenergisien lämmön hyödyntämiskäytöksiä.

Stirling-moottoreita on käytetty ajoneuvoissa, sähköntuotannossa, aurinkovoimasovelluksissa, vesipumpuissa, jäähdytyskoneissa, maatalouden kastelujärjestelmissä, meriajoneuvoissa, ydinvoimaloissa, keinosydämissä, sotilaallisissa sovelluksissa, hydraulipumpuissa, ilmastointijärjestelmissä ja avaruusaluksissa. (Erol ym. 2017, 7.)

3.1 Aurinkovoimaan yhdistettynä

Kuvassa 13 on Stirling-moottori yhdistettynä paraboliseen lautasjärjestelmään. Konsentraattori keskittää auringon säteet lämmitinosaan parabolisen lautasen kautta, josta moottori saa käyttövoimansa. Keskityssuhteen ja lämpötilan on oltava melko suuria. Tämänkaltaisissa moottoreissa paine on suuri, jopa 20 MPa. Laitteisto on monimutkainen ja siksi kallis. (Alaphilippe ym. 2007, 3.)



Kuva 13. SES Stirling-järjestelmä parabolisella lautasella. (Alaphilippe, Bonnet & Stouffs 2007, 3)

Aurinkovoimaan yhdistetty Stirling-tekniikka ei ole uusi asia. Ensimmäisen rakensi John Ericsson jo vuonna 1872. Sunpower Inc. suunnitteli ja rakensi 1 kW vapaamäntämoottorin, mikä oli suoraan yhdistetty vaihtovirtageneraattoriin. (Martini 1983, 406.)

3.2 Jäähdytysteknologia

Philips alkoi tutkia Stirling-tekniikkaan perustuvaa jäähdytystä vuodesta 1946 asti ja kehitti kaasujäähdytykseen perustuvan kryogeneraattorin. Tämä kone käyttää hyödykseen Stirling-syklin ominaisuutta toimia käänteisesti eli moottori kuluttaa sähköä ja tuottaa kylmää mekaanisella liikkeellä. Laitteella voidaan jäähdyttää lähes kaikkia nesteitä ja kaasuja hyvin matalaiin lämpötiloihin, Stirling Cryogenics-yhtiön mukaan voidaan päästä jopa 20–200 Kelvinin lämpötiloihin. (Stirling cryogenics 2021) Laite käyttää työaineena heliumia, joka ei ole kosketuksissa jäähdytettävään aineeseen. Prosessi on kaksivaiheinen sisältäen 2 regeneraattoria, kaksi jäähdytintä ja kaksi paisuntavaihetta. (Kuva 14.)



Kuva 14. 2-vaiheinen Stirling-kryogeneraattori (Stirling cryogenics 2021)

Sovellukset tälle kryogeneraattorille vaihtelevat tieteen parista korkeiden lämpötilojen suprajohteisiin sekä avaruussimulaatiokammioihin ja käytännön kohteisiin, kuten magneettikuvaukseen vaadittavaan magneetin viilennykseen, maa- ja biokaasun nesteytykseen ja observatorioiden käyttöön (Stirling Cryogenics, 2021).

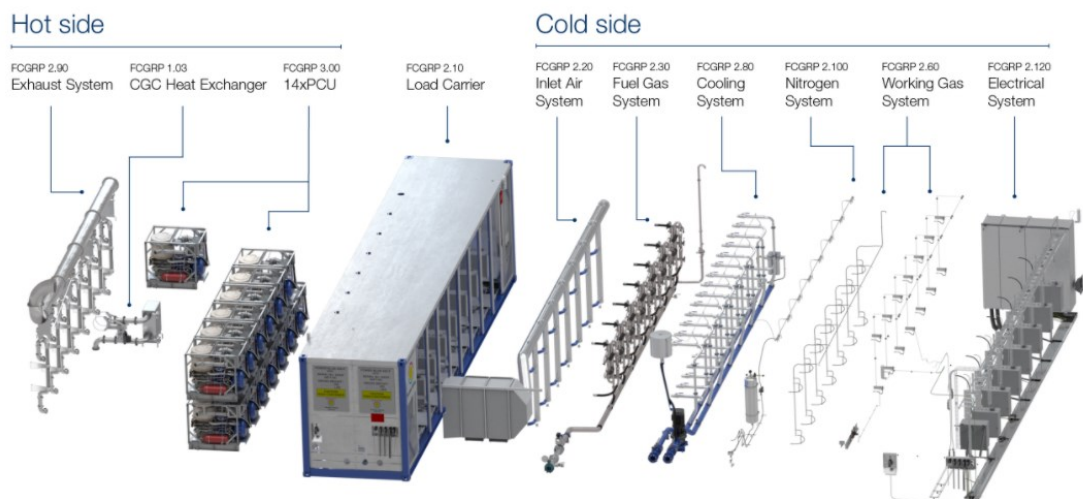
3.3 Propulsiotekniikka

Larsonin (2005, 4–5) mukaan Stirling-moottoriin perustuva AIP-järjestelmä (Air-Independent Propulsion) antaa Diesel-moottorilla kulkevalle sukellusvenelle merkittäviä etuja. Se toimii vaihtoehtona pääakustolle potkureiden ja muun koneiston tehon lähteenä pidentäen akkujen lataamisvälejä ja antaen samanlaisia häiveominaisuuksia kuin akustoa käytettäessä. Kaksitoiminen Stirling-moottori saa järjestelmässä tarvitsemansa lämpövoiman palamisreaktioista eli hapest ja matalarikkisestä dieselpolttoaineesta ja tehoa voi syntyä jopa 75 kW. Kaksitoiminen tarkoittaa, että männän molemmat puolet tekevät työtä. AIP-järjestelmä on ollut toiminnassa yli 15 vuotta ja modulaarisen suunnittelunsa ansiosta voidaan integroida lähes mihin tahansa sukellusveneseen.

3.4 Kaivostekniikka

Ruotsalainen yritys Swedish Stirling AB valmistaa Stirling-tekniikkaan perustuvia modulaarisia yksiköitä teollisuuden savukaasujen hyötykäyttämiseksi. Näitä PWR BLOK 400-F yksiköitä on ajateltu käyttöön Etelä-Afrikan ferrokromituotantoon sekä muualle teollisuuteen savukaasujen hyödyntämiseksi ja yritys lupaa mittavia hiilidioksidin vähennyksiä tällä teknologialla. Yksikössä on 14 Stirling-moottoria, kokonaistehoksi on ilmoitettu 400 kilowattia ja hyötysuhdeeksi on ilmoitettu 30 %. (Swedish Stirling Ab 2022.)

Kuvassa 15 näkyy PWR BLOK 400-F -järjestelmän poikkileikkaus alajärjestelmien. Sen modulaarinen rakenne sopii hajautettuun energiantuotantoon ja eri käyttökohteisiin.



Kuva 15. Swedish Stirling PWR BLOK 400-F leikkauskuva. (Swedish Stirling, 2021)

Swedish Stirling AB:n (2022) mukaan yksikköön on integroitu kylmän ja kuumman puolen lisäksi sisään tulevan ilman, polttoaineen, jäähdytyksen ja työaineen eli typen putkistot järjestelmien sekä sähköisen järjestelmän mittatietoja ja valvontaa varten.

3.5 Lääketiede

Pieniä Stirling-moottoreita on kehitetty keinotekoisiksi sydämiä. Moottori voidaan skaalata pieneen kokoon ja on myös luotettava, joten se voisi sopia tähän käyttötarkoitukseen. Eräs sopivan kokoinen moottori kävi 4.07 vuotta tauotta, ennen kuin sähkölämmittimet hajosivat. (Martini 1983, 408.) Stirling

Technology Company kehittivät 3–5 W lämpökompressorin osana TVAS- järjestelmää, mikä auttaa sydämen pumppaamista. Lämmönlähteenä oli sähköinen lämmitin. Kokonaisuudessaan ensimmäinen moottori toimi 60 000 tuntia. toimien yhtäjaksoisesti 36 000 tuntia. Ongelmia, jotka korjattiin, olivat syrjäyttäjäkäytön kuulalaakerit ja hydraulisten venttiilien magnesiumsuutin. Kriittisimpänä osana järjestelmää pidettiin metallipalkeita, mitkä eristivät työaineena toimineen heliumin hydraulineesteestä. (Ross & Dudenhoefer 1991, 1–2.)

4 MATALAENERGINEN LÄMPÖ

Matalaenergisellä lämmöllä tässä työssä viitataan teollisien prosessien lämpötilatasoihin ja lämpövirtauksiin, joita ei tavanomaisesti hyödynnetä sähköntuotannossa. Lämpötiloja tarkastellessa puhutaan yleisesti ylijäämälämmöstä, hukkalämmöstä tai matalalämmöstä. Koska työssä tarkastellaan juuri tällaisia tapauksia, rajataan käytössä olevat lämpötilatasot 50–500 °C välille.

4.1 Ylijäämä- ja hukkalämpö teollisuudessa

EU:n antaman direktiivi määrittelee hukkalämmön ja -kylmän teollisuuden ja sähköntuotannon laitosten sekä palvelualojen väistämättä syntyvänä sivutuotteena, joka katoaisi käyttämättömänä ilmaan ja veteen, jos sitä ei käytettäisi kaukolämmitykseen tai jäähdytykseen tai yhteistuotantoon. (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2018/2001).

Motivan (2013, 2) mukaan teollisuuden tuotannon ylijäämä- ja hukkalämmön lähteitä esimerkiksi ovat jäte- ja jäähdytysvedet, poistohöyryt, prosessi- ja savukaasut, kuivureiden poistokaasut ja koneellisen jäähdytyksen lauhdelämpö. YIT:n (2010) mukaan vuosittain tuotannon hukkalämpömäärä on 54 TWh, josta hyödynnettävissä olisi noin 4 TWh (Motiva 2013, 2).

Motivan (2014, 24) raportin mukaan erään yrityksen reaktorin jäähdytysvedet, joita joudutaan jäähdyttämään 286 °C lämpötilasta 60 °C lämpötilaan, jouduttiin suurin osa laskemaan suoraan mereen. Hukkaan menevä lämpöteho oli 5–7 MW.

Perusmetalliteollisuudessa erään yrityksen korkealämpöisiä jäähdytysvesiä ajateltiin hyötykäytettäväksi kaukolämpöverkkoon. Potentiaali vuositasona olisi

ollut noin 40 GWh, jos mitoitus kaukolämpöakun lämpötiloille olisi 100/120 °C. Tämä ei siihen aikaan ollut mahdollista, koska lämmöntalteenoton piirin tuleva lämpö oli alle 92 °C ja hukkalämpö hävitettiin jäähdytystornin kautta taivaalle. Tämä ei olisi toteutuessaan kesäkaudella toiminut kaukolämmön kulutuksen vähyysden takia. (Motiva 2014 25–26). Toisen metallialan yrityksen matalalämpötilaisia jäähdytysvesiä käytettiin tasaisesti jäähdyttämään valokaariuunia, jatkuvavalukonetta sekä muita pienempiä kohteita. Kokonaislämpöenergiapotentiaali oli 66 GWh/a, joka suurelta osin siirrettiin lämmönvaihtimien ja jäähdytystornin kautta taivaalle. Tähän tapaukseen suositeltiin myös ylijäämälämpönlämmön hyödyntämistä lämpönä (Motiva 2014, 27–28).

Kuvassa 16 on ylijäämälämmön hyödyntämistä kuvattu lämpötilatasojen kautta. Alle 100 °C tasolla on ajateltu lämmönsiirtimiä ja lämpöpumppuja. Siitä korkeammilla lämpötiloilla hyödyntämiseen on ajateltu ORC-prosessia, savukaasupesuria ja jätelämpökattilaa.



Kuva 16. Kasvavan lämpötilason vaikutus hyödynnettävyyteen. (Motiva Oy 2014, 53)

Motiva (2014, 53–54) luettelee matalalämpöisiksi, eli alle 50 °C, ylijäämälämpönlähteiksi prosessien jäähdytysvedet ja poistoilmavirrat sekä koneellisen jäähdytyksen lauhde-energian. Tätä suuremmissa lämpötilatasoissa, eli 50–

350 °C, lämmönlähteiksi luetellaan erilaiset höngät, öljyvoideltujen paineilma-kompressoreiden jäähdytys, savukaasut ja prosessien kuumat poistokaasut.

Vuonna 2018 lauhdelaitosten hukkalämmön määrä arvioitiin olevan 44 TWh, josta 43 TWh on ydinvoimalaitoksilta. Laitosten hukkalämmön hyödyntämistä kaukolämpönä vaikeuttaa sijainnin etäisyys lämmönkäyttökohteista ja vaatisi lämmönsiirtoinfrastruktuuria. Siirtokapasiteettia ei kuitenkaan kannata rakentaa kattamaan talven suurimpia ja monista isoista kaupungeista löytyy lämmön tuotantoon jo valmista kalustoa, kuten lämpöpumppuja ja jätteenpolttolaitoksia. Ydinvoimaloita ajetaan läpi vuoden, joten kesällä kun kaukolämmön kysyntä on pienimmillään, hukkalämpöä ei pystytä hyödyntämään tehokkaasti, koska sen määrä ylittää kysynnän. (AFRY 2020, 13–14.)

Jätteenpolttolaitosten hukkalämmön määräksi on vuonna 2018 arvioitu 1,2 TWh, joista 39 % hyödynnettiin. Monissa laitoksissa on käytössä LTO-järjestelmät, mutta koska laitokset polttavat yhdyskuntajätettä läpi vuoden, ne lauhduttavat kesäisin lämpöä ympäristöön, koska lämmön kysyntä on alhainen. (AFRY 2020, 15.)

Konesaleissa hukkalämpöä syntyy sähköä käyttävien laitteiden toiminnasta ja sen määrää pidetään merkittävänä. Koneita on jäähdytettävä ja lämpöä on siirrettävä saleista pois. Konesaleja on Suomessa arviolta yli 50 ja määrä lisääntyy mahdollisesti tulevaisuudessa. Arvioiden mukaan hukkalämpöpotentiaalia on 2 TWh. Hukkalämmön hyödyntämistä kaukolämpönä vaikeuttaa esimerkiksi konesalien etäisyydet lämmön kuluttajista. (AFRY 2020, 27–28.)

4.2 Matalaenergisien lämmön rooli sähköntuotannossa

Energiategollisuuden (2021) vähähiilisyystiekartan mukaan tulevaisuudessa energijärjestelmät tulevat uudistumaan. Liikenne- lämmitys ja teollisuusalat yhdistyvät sähkö- ja lämmitysverkkojen kautta sektori-integraatiota käyttäen ja julkista tukea ohjataan uusille pilotointihankkeille ja tuotekehitykselle. Sähkön kulutus lisääntyy ja toimitusvarmuuteen panostetaan. Tämä tarkoittaa jouston ja varastoinnin lisäämistä. Teollisuus sähköistyy voimakkaasti ja siitä tulee tehdä kannattavaa. Teollisuudessa vähähiilisyys luo sähkönkysyntäsignaalin, joka kannustaa uusiin investointeihin sähköntuotannossa. Sähkön tarpeen

kasvu voi olla jopa 50 % vuoteen 2050 mennessä. Päästöjä vähennetään korvaamalla teollisuuden fossiilisten polttoaineiden käyttöä ja sähköistämällä prosesseja. Kaukolämpöä muutetaan matalalämpöiseksi ja hukkalämmön lähteet ja niiden taloudellinen potentiaali on selvitettävä.

EU:n Waste heat-projektin (2022) mukaan hukkalämmön lähteitä tulisi ensisijaisesti yrittää pienentää parantamalla eristyksiä ja optimoimalla prosesseja. Sisäinen hyötykäyttö hoidettaisiin integroimalla hukkalämpö tuotannon prosesseihin tai lämmittämällä rakennuksia. Kolmantena vaihtoehtona olisi energian muunto esimerkiksi sähköksi tai absorptio- tai adsorptiojäähdytyksen käyttö. Sähköksi muuntamista pidetään joustavimpana energianmuuntoprosessina ja esimerkkinä on annettu ORC-prosessi. Sähköntuotannon haittapuolena pidetään alhaista hyötysuhdetta hukkalämmön käytössä ja sitä pitäisi kehittää.

5 STIRLING-TEKNIIKAN KEHITYS JA LÄMMÖN HYÖDYNTÄMINEN

Tässä luvussa tarkastellaan tutkimuksia liittyen Stirling-tekniikan kehitykseen, erilaisiin teknillisiin ratkaisuihin sekä sovelluksiin matalaenergisien lämmön hyödyntämisessä. Lisäksi esitellään asioita käytön haasteisiin liittyen sekä teknologiaa, jonka käyttötavat kilpailevat Stirling-tekniikan kanssa matalaenergisien lämmön käyttökohteissa.

5.1 Kehittyvät teknologiat

Sedlák ym. (2017, 7–10) tutkivat matalan lämpötilaeron hyödyntämistä gamma-moottorin prototyypillä. Tarkoituksena oli valmistaa moottori, joka on helppo koota ja purkaa ja sallisi helposti osien vaihdon optimoinnin takamiseksi. Monet osista olivat helposti saatavilla tai käsityökaluilla valmistettavissa ja osa osista oli ABS-muovia, kuten syrjäyttäjä ja sylinteri. Tavoitteena oli myös tehdä moottori koulutuskäyttöön, joka kestäisi testejä ja toimisi mahdollisimman pitkään alhaisella lämpötilaerolla. Kuitenkin materiaali- ja rakennuspuutteiden ja epäsopeuuksien takia testaus alkuperäisessä tarkoituksessa epäonnistui.

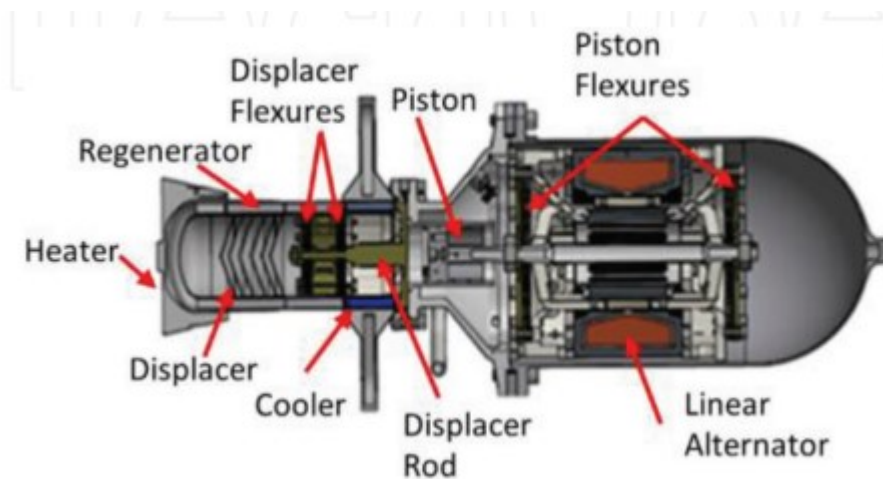
Cool Energy Inc. on rakentanut useita pienten lämpötilatasojen koneita, noin 150 °C – 400 °C, vuodesta 2006 saakka. Näistä yksi on sähköteholtaan 25

kW ja siihen on integroitu vaihtovirtageneraattori. Tämän tehon saamiseksi moottorin kuuman puolen lämpötila olisi 400 °C ja kylmän 20 °C. Moottori käyttää lineaari-rotaatiokäyttömekanismeja ja siinä on ruostumattomasta teräksestä valmistettu verkkomallinen regeneraattori. Moottorin kuumaa yläosaa on myös eristetty ja koneessa on instrumentointia liittyen mittaukseen ja testaukseen ja säätöön. Kokonaishyötysuhde nousi testauksissa 31 %. Tämä demonstroi, että Stirling-moottoreita voidaan suunnitella, optimoida ja rakentaa tuottamaan taloudellisesti merkittäviä määriä sähkötehoa matalista ja keskilämpöisistä lähteistä, kuten hukkalämmöstä. (Smith ym.2016, 2–20.)

Durcansky ym. (2020,1–14) tutkivat Stirling-moottorin käyttöä hukkalämmön hyödyntämiseen. Tutkimukseen käytettiin alfa-typin moottoria, jossa keskipaine vaihteli 48 baarin ja 81 baarin välillä, maksimitehon ollessa noin 4000 W toimien 21 % hyötysuhteella. Moottori toimi lämmittimen ollessa 300 °C lämpötilassa. Tutkimuksen perusteella sähkötehoa saadaan lisää nostamalla lämpötilaa ja painetta ja tämän mallin kone pystyy hyödyntämään keskitasoisia lämpötiloja ja se sopisi käyttöön teollisuuteen.

Lazaar & Boutammachte (2022) esittävät tutkimuksessaan Stirling moottoreiden käyttöä hukkalämmön talteenotossa sementtitehtailla. Gamma-typin moottoria mallinnettiin hukkalämmön hyödyntämiseen klinkkerin jäähdytysprosessista. Mallinnusta varten kehitettiin epäideaali adiabaattinen malli Matlab-ohjelmistoon. Malli pystyisi tuottamaan 1641,36 W tehoa 21,29 % termisellä hyötysuhteella. Tulosten perusteella Stirling-moottori voisi sopia hukkalämmön talteenottoon teollisella sektorilla.

Stirling-tekniikan lupaavimpia muunnoksia on vapaamäntämoottori. Se koostuu kuuman ja kylmän puolen lämmönvaihtimista, regeneraattorista, syrjäyttäjistä, joustavista flexure-laakereista, männästä ja lineaarigeneraattorista käämityksineen. (Kuva 17)



Kuva 17. Vapaamäntämoottori. (Qiu & Solomon 2018)

Vapaamäntämoottoreissa ei ole käyttömekanismeja, vaan männän liikkeeseen vaikuttavat vain työaineen painenvaihtelut. Mekaanisten osien puute ja tiivisteet takaavat luotettavuuden ja pitkän käyttöiän. Vapaamäntämoottorin suunnittelu on kuitenkin vaikeampaa, koska jokainen yksittäinen osa on sidoksissa toisiinsa. Moottoria voidaan käyttää korkeissa lämpötiloissa, esimerkiksi 800 °C, mutta tämä asettaa tiettyjä vaatimuksia materiaaleille. Tällä moottorilla voidaan päästä noin 38 % sähköhyötysuhteeseen. Kehittyvät valmistusmenetelmät voivat tuoda lisää luotettavuutta, parantaa hyötysuhdetta ja lisätä kestävyttä näihin koneisiin. (Qiu & Solomon 2018, 3–18.)

Nasan kehittämä vapaamäntämoottori Technology Demonstration Converter #13 oli vuonna 2018 käynyt täydellä teholla 110 000 tuntia vuodesta 2003 saakka, tehden siitä pisimpään yhtäjaksoisesti toimineen lämpövoimakoneen. Työaineena on käytetty heliumia ja lämmönlähteenä käytettäisiin avaruusalussovelluksissa plutonium 238-radioisotooppia. Merkittävänä mekaanisena rakenneosana pidetään flexure-laakeria, joka mahdollistaa liikkuvien osien liikkeen ilman kontaktia ja tiivistää myös sylinterin ja männän välin. Laakeri on spiraalin muotoon leikattu pala jousiterästä, jolla on korkea väsymisenkesto. Etuina termosähköisiin generaattoreihin verrattuna on korkeampi hyötysuhde johtuen termosähköisten elementtien johtumishäviöistä. (Cole 2018.)

Monisylinterisellä Stirling-moottorilla voi olla mahdollista saavuttaa parempi hyötysuhde ja siksi voi olla parempi vaihtoehto hyödyntämään alempia lämpötilatasoja, kuten hukkalämpöä. Japanin kansallisessa merenkulun tutkimusinstituutissa on käytetty tutkimuksissa 3-sylinteristä prototyyppiä, jolla pyrittiin

hyödyntämään 400 °C tulolämpötilaa. Sylinterit ovat kytketty sarjaan ja moottori sisältää useita ainutlaatuisia osia, kuten alumiiniseoksesta tehdyn lämmitimen. Tavoitteena oli saada 96 W tehoa 1100 rpm kierrosnopeudella. Kokeissa ei tätä saavutettu. Syinä olivat materiaalivalinnoista johtuvat lämpöhäviöt sekä mekaaniset häviöt. Kokeissa kuitenkin ilmeni, että koko moottorin akseliteho oli enemmän kuin moottorin yksiköiden akselitehojen summa, joten tämän perusteella se voisi hyvin sopia hukkalämmön hyödyntämiseen. (Hirata & Kawada 2005, 315–324.)

White (2005, 19–20) ehdottaa monisylinteristen Stirling-moottorien ja vapaamäntämoottorien yhdistämistä. Monisylinterisellä vapaamäntämoottorilla olisi hänen mukaansa selviä etuja niin tavallisiin Stirling moottoreihin, kuin vapaamäntämoottoreihin. Näitä etuja olisivat esimerkiksi monimutkaisten ja käyttöä rajoittavien käyttömekanismien puuttuminen, tyypillisten tiivisteiden ja voitelun puuttuminen, kitkahäviöiden eliminointi kampiakselin laakereissa ja vaihtolevyissä, suora kolmivaiheisen tehon tuottaminen ja korkea suorituskyyky laajalla lämpötila-alueella.

5.2 Käytön haasteet

Jarva & Niskanen (2011) Stirling-moottoreiden huonoina puolina voidaan pitää kallista hintaa, hidasta kierrosnopeuden säätöä, pientä sähköhyötysuhdetta ja vaatimuksia mäntien ja sylinterien tiivisteille (Motiva Oy 2014, 49).

Kirillov & Vedmich (2005, 177) esittävät 3 osa-aluetta, jotka vaikeuttavat tehokkaan Stirling-moottorin valmistamista. Ensiksi ovat vaikeudet suunnittelun matemaattisissa laskentametoodeissa, liittyen esimerkiksi oikean koneen mäntien jatkuvaan liikkeeseen ja ei-stationaarisen lämpömassan vaihtumiseen koneen sisällä. Toiseksi eri pääkohtien suorituskyvyn suunnittelun vaikeudet, kuten korkeat käyttöpaineet, esimerkiksi 40 MPa, työaineiden ominaisuudet ja konfiguraatioiden moninaisuus. Kolmanneksi teknologisen suorituskyvyn ongelmat, kuten raudattomien metallien hitsaus ja regeneraattorin valmistus.

5.3 Kilpailevat tekniikat

ORC-kiertoprosessi perustuu Rankine-voimalaitosprosessiin. Siinä käytetään hyväksi orgaanisen kiertoaineen höyrystymistä ja lauhtumista prosessin eri

vaiheissa. Tätä voidaan käyttää alle 350 °C lämpötiloissa ja oikean kiertoaineen kanssa jopa 100 °C lämmönlähteiden kanssa. Käytännössä ORC-prosessilla päästään noin 45 % teoreettisesta maksimaalisesta hyötysuhteesta. Kiertoaineilla voi kuitenkin olla ympäristölle haitallisia vaikutuksia ja ne voivat reagoida lämpötilaan ja muihin kemikaaleihin. Tyypillisiä lämmönlähteitä ovat pienet biovoimalaitokset, kaatopaikkakaasu, teollisuuden jätelämpö ja geoterminen lämpö. (Motiva oy 2014, 38–45.)

Tekniikka & Talous (2013) uutisoi, että tutkijat ovat kehittäneet joustavia termo- eli lämpösähköisiä generaattoreita. Termosähköiset elementit tuottavat sähköä lämpötilaerosta. Nämä uudet generaattorit voitaisiin sijoittaa voimalaitosten betonisten jäähdytintornien seiniin, jolloin syntyisi tarvittava lämpötilaero ulko- ja sisäpuolelle. Tällä voitaisiin vähentää turbiinien lämpöhukkaa ja kasvattaa sähköntuotantoa. Hyötysuhteet ovat kuitenkin vielä pieniä, noin 15–20 %. (Motiva oy 2014, 48.)

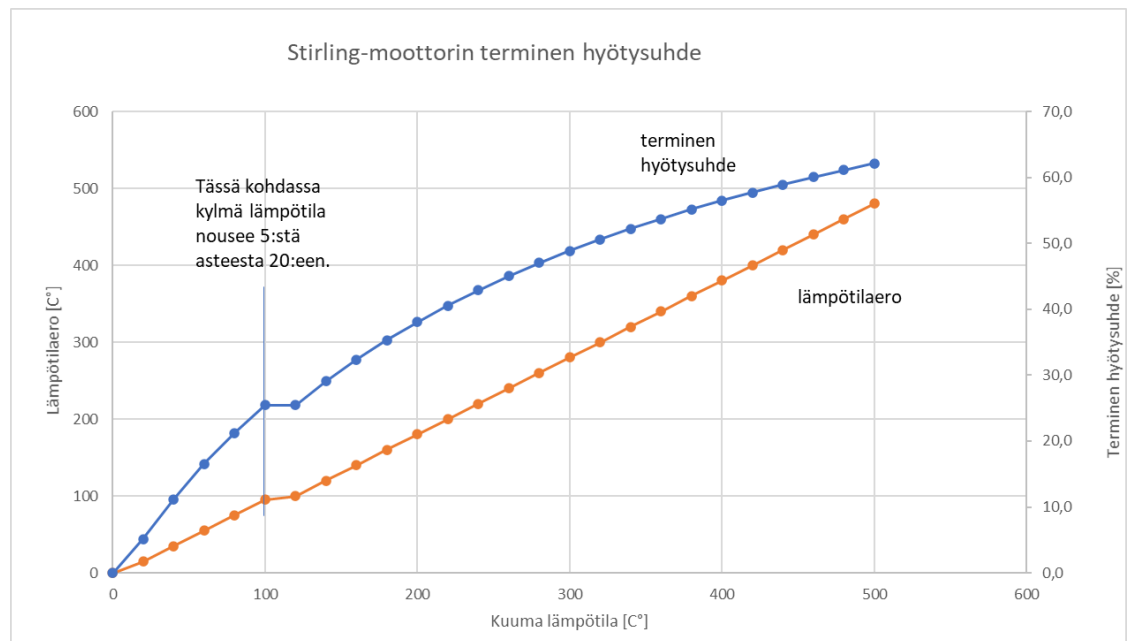
6 SÄHKÖNTUOTANTO

Tässä luvussa esitellään laskentaa sekä tehdään päätelmiä Stirling-moottorin termisestä hyötysuhteesta, tarvittavista virtauksista alhaisemmissa lämpötilatasoissa, takaisinmaksuajoista erilaisille investoinneille ja eri kokoisille moottoreille sekä esitellään erilaisia mahdollisia kytkentäesimerkkejä 3D-mallien avulla. Laskennassa on käytetty arvioituja lukuja, joita voidaan pitää yleisesti tähän tarkasteluun sopivina. Kuitenkin nämä ovat karkeita arvioita ja energiantuotannon kehittyessä ja markkinoiden muuttuessa nämä tarkastelut voivat olla epätarkkoja ja kappaleessa esitetyt laskut ja esimerkit pohjautuvat tekijän omiin näkemyksiin. Kuvaajat ja 3D-mallit ovat tehty tätä työtä varten.

6.1 Terminen hyötysuhde

Luvussa 2 esiteltiin laskuteoria, jolla voidaan määrittää Stirling-moottorin terminen hyötysuhde eri lämpötilatasoilla. Kuvassa 18 tarkastellaan koneen kylmän ja kuuman puolen yli termistä hyötysuhdetta lämmönlähteen funktiona. Laskentaa varten on ajateltu asetelma, jossa 100 °C:seen saakka kylmän puolen lämpötila olisi 5 °C. Tämä vastaisi tilannetta, jossa moottorin lämpimän puolen lämmönsiirtimiin johdettaisiin lämmintä vettä ja kylmälle puolelle kylmää prosessivettä tai pohjavettä. Sadan asteen rajan jälkeen voidaan ajatella,

että lämmönlähteenä olisi höyryä tai savukaasua ja lämpönieluna noin 20 °C:ista ilmaa.



Kuva 18. Stirling-moottorin terminen hyötysuhde.

Kuvaajasta nähdään, että terminen hyötysuhde voi teoreettisesti olla erittäin hyvä muutaman sadan asteen lämpötilaerolla. On kuitenkin muistettava, että käytännössä oikeaan hyötysuhteeseen vaikuttavat erilaiset häviöt ja lämpötilaeroa ei saada kunnolla hyödynnettyä, jolloin hyötysuhde sähköntuotannossa on noin kolmanneksen termisestä hyötysuhteesta. Tällöin hyötysuhde jää noin 20–30 %:n väliin, joka vastaa kirjallisuudessa kuvattuja lukuja.

6.2 Virtaukset

Matalaergisen lämmön hyödyntäminen sähköntuotannossa vaatii erilaisia virtauksia riippuen käyttökohteesta. Nämä virtaukset voivat olla esimerkiksi vesi-höyryä, savukaasua tai vettä jostakin tehdasprosessista. Laskelmissa määritettiin virtaukset 1000 kW:n teholla, koska tästä arvosta voidaan saada selville virtauksen arvot alemmille tehotasolle. Näille tapauksille voidaan määrittää massavirtaus eri tehotasolle matemaattisesti.

Massavirta käyttäen ominaislämpökapasiteettia ja lämpötilaeroa voidaan määrittää yhtälöstä 8.

$$q_m = \frac{\Phi}{c\Delta T} \quad (8)$$

jossa	q_m	massavirta	[kg/s]
	Φ	lämpöteho	[J/s]
	c	ominaislämpö	[J/kgK]
	ΔT	lämpötilaero	[K]

Massavirta entalpiaeron kautta määritetään yhtälöstä 9.

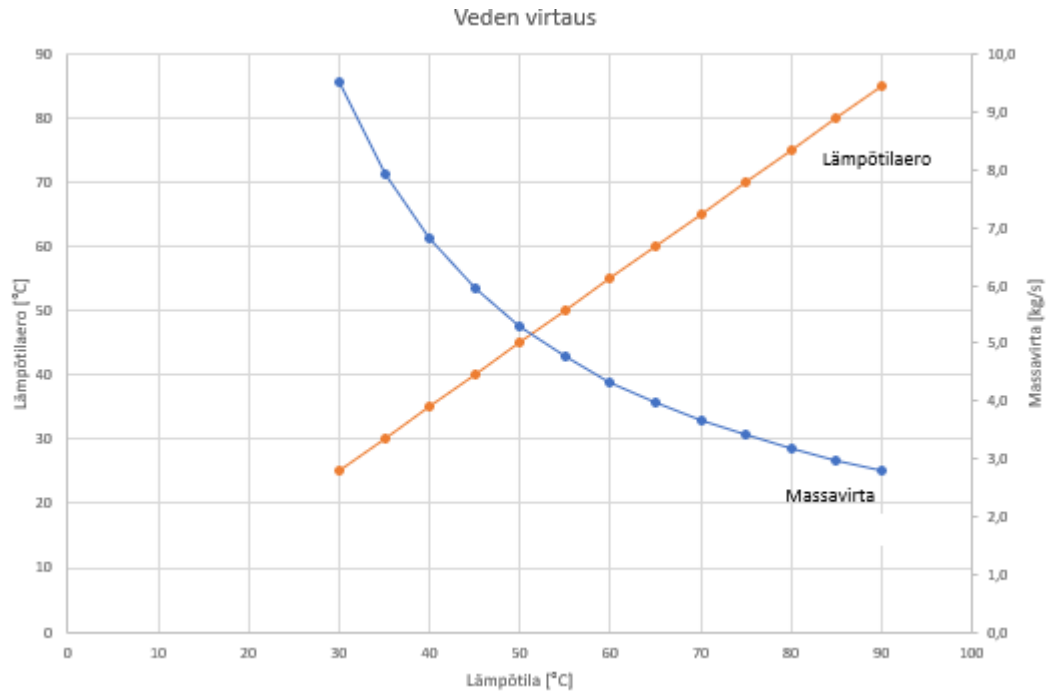
$$q_m = \frac{\Phi}{\Delta h} \quad (9)$$

jossa	q_m	massavirta	[kg/s]
	Φ	lämpöteho	[J/s]
	Δh	entalpiaero	[J/kg]

Lasketaan esimerkkinä 1000 kW:n teholle tarvittava höyryn virtaus syöttövesisäiliöstä. Oletetaan tilanne jossa 100°C höyry lauhtuu alle 30 °C vedeksi.

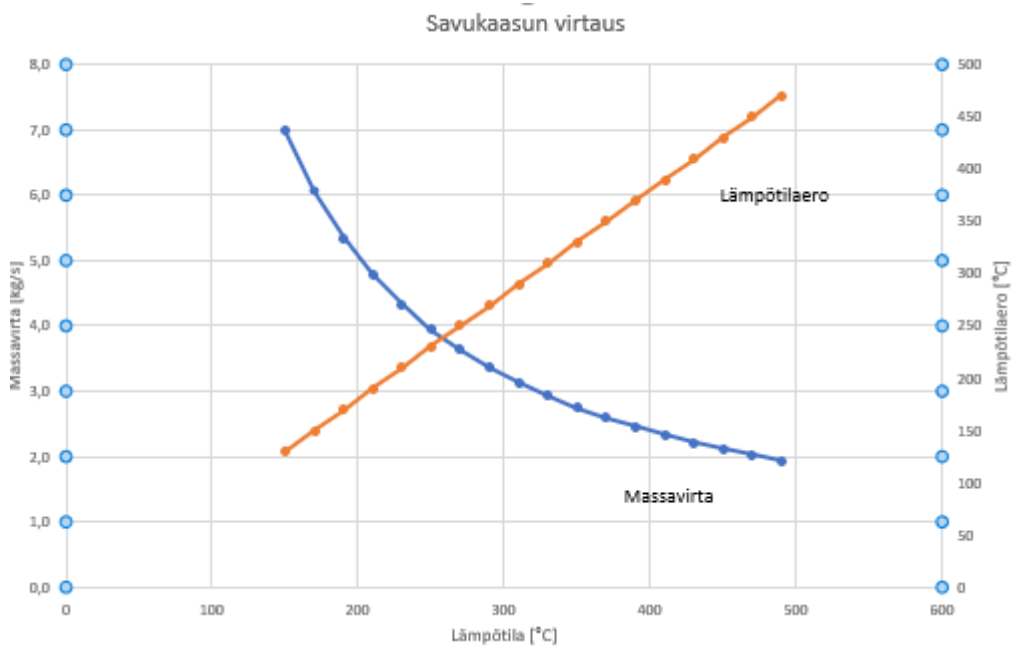
$$\text{Hönlöhöyryn massavirtaus} = \frac{1000kW}{(2675 - 188)kJ/kg} = 0,4021 kg/s$$

Kuvasta 19 voidaan nähdä vedelle tarvittava massavirta 1000 kW:n teholle kuumen veden eri lämpötila-arvoilla. Massavirta (sinisellä) laskee lämpötilaeron (oranssilla) noustessa. Kuvaaja voisi vastata tilannetta, jossa lämmintä prosessivettä johdettaisiin kuumalle puolelle moottoria. Lämpönieluna toimisi noin 5 °C vesi. Veden ominaislämpökapasiteettina on 4,2 kJ/kg°C.



Kuva 19. Veden massavirtaus.

Savukaasun virtaus lämpötilojen 150 °C ja 490 °C välillä on määritelty kuvassa 20. Tämä vastaisi esimerkiksi savukaasupesurin jälkeisiä jäähtyneitä savukaasuja. Lämpönieluna toimisi noin 20 °C ilma, esimerkiksi huoneilma. Kuvaajasta nähdään, että massavirta (sinisellä) laskee lämpötilaeron (oranssi) noustessa. Savukaasuille ei ole olemassa määriteltyä ominaislämpökapasiteettia, koska se luonnollisesti vaihtelee perustuen käytettyihin polttoaineisiin ja sekoitussuhteisiin. Tässä tapauksessa arvoksi on annettu 1,1 kJ/kgC°.



Kuva 20. Savukaasun virtaus.

Kuvaajista nähdään, että veden ja savukaasun massavirtauksen arvot ovat lähellä toisiaan johtuen veden korkeammasta ominaislämpökapasiteetista. Voidaan arvioida, että laskennassa saadut virtausarvot vastaavat virtauksia, joita ilmenee teollisissa ympäristöissä.

6.3 Kannattavuustarkastelu

Kannattavuutta voidaan arvioida takaisinmaksuajan kautta käyttäen muuttujina sähkön hintaa sekä käyttötuntien määrää vuodessa. Takaisinmaksuajalla tarkoitetaan tässä tapauksessa lisäsähkön myynnistä muodostuvan tuoton ja investoinnin perustella laskettua takaisinmaksuaikaa. Luvussa tarkastellaan kolmea eri teholuokkaa ja investointia, joiden arvot ovat arvioituja. Näiden arvojen voidaan ajatella olevan sopivia tämän tason tarkasteluun, ottaen huomioon asiaa koskevan tiedon niukkuuden. Takaisinmaksuajan kannattavuutta on taulukoissa porrastettu väreillä punaisesta vihreään ja voidaan ajatella, että alle 10 vuoden takaisinmaksuaika voi alkaa olemaan kannattava. Funktion muuttujina käytetään sähkön hintaa ja käyttötunteja. Takaisinmaksuaika määritellään yhtälöstä 10.

$$TMA = \frac{I}{P * t * c} \quad (10)$$

jossa	TMA	takaisinmaksuaika	[a]
	I	investointi	[€]
	P	sähköteho	[MW]
	t	käyttötunnit vuodessa	[h/a]
	c	sähkön hinta	[€/MWh]

Lasketaan esimerkkinä taulukosta 1. takaisinmaksuaika 8760 h/a käyttötuntiajalla ja 40 €/MWh sähkön hinnalla.

$$Takaisinmaksuaika = \frac{50\,000\text{€}}{0,04\text{MW} * 8760\text{h/a} * 40\text{€/MWh}} \approx 3,6\text{ a}$$

Tarkastellaan ensin 40 kW:n moottoria. Kyseessä voisi olla pienempi kokeellinen yksikkö, jolloin investointi voi olla suhteessa korkeampi johtuen mahdollisista yksilöllisemmistä suunnittelu-, materiaali- ja valmistuskustannuksista.

Taulukosta 1 voidaan nähdä, että pienemmän moottorin takaisinmaksuaikaan vaikuttavat enemmän sähkön hinta kuin käyttötunnit, koska jos sähkön hinta pysyisi korkealla, takaisinmaksuaika voisi olla alle 10 vuotta 600:n tunnin käytöllä vuodessa. Tämä tuntimäärä vastaa 25:ttä päivää. Voidaan tosin ajatella, että näin pientä yksikköä haluttaisiin käyttää mahdollisimman paljon.

Taulukko 1. Takaisinmaksuaika 40 kW:n moottorille.

Investointi		50000 €					
Moottorin teho		40 kW					
Käyttötunnit h/a							
Sähkön hinta €/MWh	100	250	600	1200	2400	4800	8760
40	312,5	125,0	52,1	26,0	13,0	6,5	3,6
80	156,3	62,5	26,0	13,0	6,5	3,3	1,8
100	125,0	50,0	20,8	10,4	5,2	2,6	1,4
160	78,1	31,3	13,0	6,5	3,3	1,6	0,9
200	62,5	25,0	10,4	5,2	2,6	1,3	0,7
250	50,0	20,0	8,3	4,2	2,1	1,0	0,6
400	31,3	12,5	5,2	2,6	1,3	0,7	0,4

Taulukossa 2 on esitetty 400 kW:n moottorin takaisinmaksuaika. Tämän kokoluokan yksikkö voisi vastata luvussa 3 esitettyä Swedish Stirling -yhtiön modulaarista yksikköä. Tässä kokoluokassa investointi saattaa olla suhteessa hie-
man edullisempi, etenkin jos markkinoilla on tarjolla valmiita kokonaisuuksia. Takaisinmaksuajat näkyvät taulukosta 2 ja voidaan huomata, että näillä laskel-
milla investointi on melko kannattava muutaman kuukauden käyttötunneilla.

Taulukko 2. Takaisinmaksuaika 400 kW:n moottorille.

	Investointi			250000 €			
	Moottorin teho			400 kW			
	Käyttötunnit h/a						
Sähkön hinta €/MWh	100	250	600	1200	2400	4800	8760
40	156,3	62,5	26,0	13,0	6,5	3,3	1,8
80	78,1	31,3	13,0	6,5	3,3	1,6	0,9
100	62,5	25,0	10,4	5,2	2,6	1,3	0,7
160	39,1	15,6	6,5	3,3	1,6	0,8	0,4
200	31,3	12,5	5,2	2,6	1,3	0,7	0,4
250	25,0	10,0	4,2	2,1	1,0	0,5	0,3
400	15,6	6,3	2,6	1,3	0,7	0,3	0,2

Suuren 1000 kW:n moottorin investointisumma on mahdollisesti laskennassa aliarvioitu, koska tämän teholuokan järjestelmä voi vaatia isompia muutoksia infrastruktuuriin käyttökohteissa, lisäputkistoa ja muuta laitteistoa sekä automatiikkaa liittyen mittaukseen ja säätöön. Taulukosta 3 nähdään, että mikäli investointi pysyisi mahdollisimman alhaisena tälle kokoluokalle, takaisinmaksuaika olisi kohtuullinen vain muutaman kuukauden käyttöajalla vuodessa.

Taulukko 3. Takaisinmaksuaika 1000 kW:n moottorille.

	Investointi			600000 €			
	Moottorin teho			1000 kW			
	Käyttötunnit h/a						
Sähkön hinta €/MWh	100	250	600	1200	2400	4800	8760
40	150,0	60,0	25,0	12,5	6,3	3,1	1,7
80	75,0	30,0	12,5	6,3	3,1	1,6	0,9
100	60,0	24,0	10,0	5,0	2,5	1,3	0,7
160	37,5	15,0	6,3	3,1	1,6	0,8	0,4
200	30,0	12,0	5,0	2,5	1,3	0,6	0,3
250	24,0	9,6	4,0	2,0	1,0	0,5	0,3
400	15,0	6,0	2,5	1,3	0,6	0,3	0,2

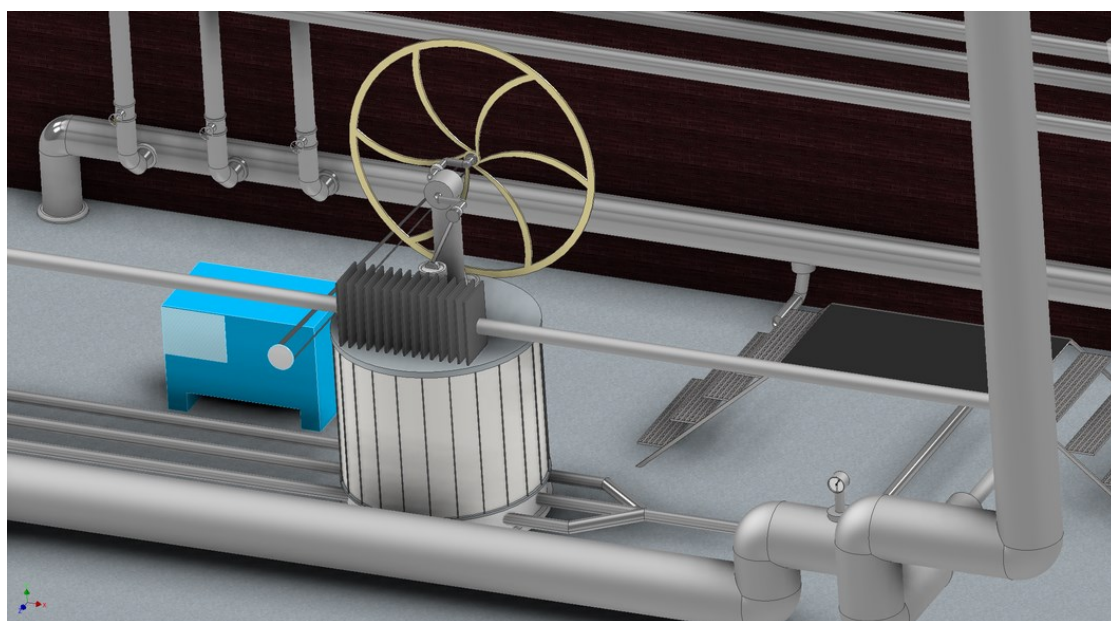
Taulukoista ilmenee, että sähköntuotanto voi olla kannattavaa kausina, jolloin sähkön hinta on korkealla ja moottoria käytettäisiin ainakin kahdesta kolmeen kuukauteen vuodesta. Tämä ajanjakso voisi vastata kesäkuukausia, jolloin lämmityksen tarve on pienempi ja kaukolämmön tuotanto on alhaisempaa. Moottorin koon kasvattaminen myös alentaa takaisinmaksuaikaa. Jos halutaan laskea kannattavuutta tarkemmin, tulisi ottaa huomioon muita muuttuvia tekijöitä, kuten ylläpito-, käyttö- ja huoltokustannuksia.

6.4 Kytkentäesimerkkejä

Työssä esitetyissä 3D-malleissa on yksinkertaistettu asioita ja laitteistojen mitasuhteet eivät välttämättä vastaa täysin realistisia tapauksia. Ne kuitenkin demonstroivat toteutuksen konsepteja ja ovat havainnollistamassa mahdollisia kytkentäideoita.

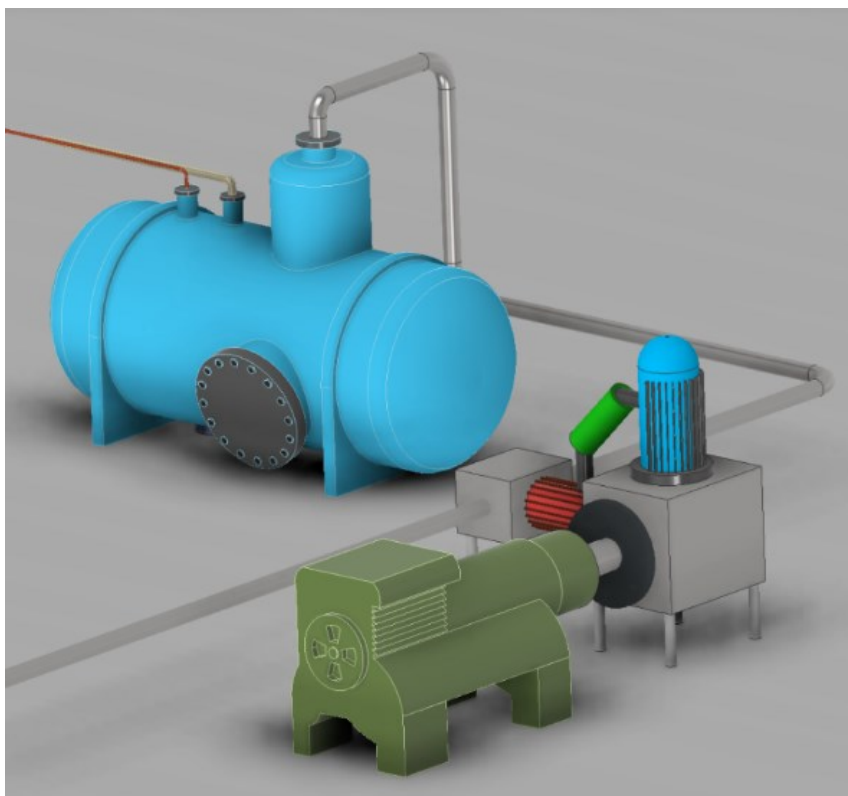
Lämpimän veden hyödyntämiseen tarvittaisiin tehokas lämpönielu sekä olisi käytettävä matalan lämpötiladifferentiaalin sovelluksia, kuten gamma-tyypin moottoria tai vapaamäntämoottoria. Näillä sovelluksilla olisi paras hyödyntämismahdollisuus koskien matalia lämpötilaeroja prosessivedessä. Etuna lämpimän prosessiveden käytössä olisi sen saatavuus, koska useimmat teolliset prosessit vaativat veden käyttöä. Haittapuolina voidaan olettaa mahdollinen veden pumppaustarve, tehokkaan lämpönielun puuttuminen tai tarvittavan tehdas- ja putkistoinfrastruktuurin puuttuminen.

Sopivan asetelman aikaansaamiseksi voidaan ajatella, että ylimääräisen lämpimän prosessiveden ja kylmän veden, kuten muihin prosesseihin pumpattujen pohjaveden tai jäähdytysvesien putkistot ovat sijoitettu lähekkäin. Tällöin voitaisiin ohjata virtauksia automaattiventtiileillä yksinkertaisista putkikyhteistä niin moottorin lämpimään päähän, kuin lämpönieluun. (Kuva 21)



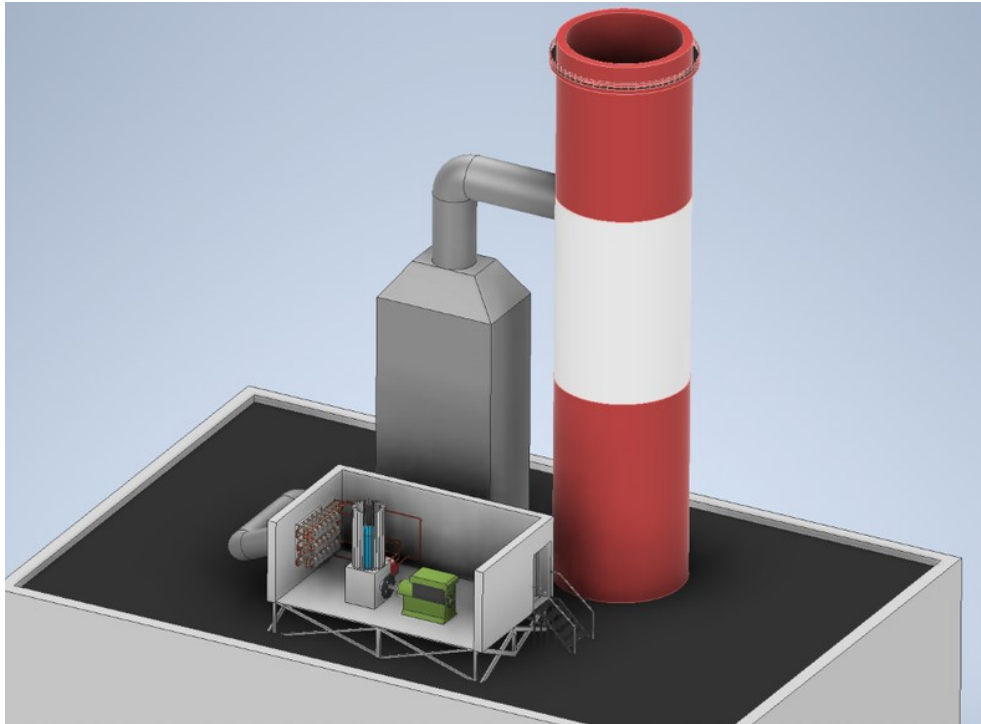
Kuva 21. Gamma-tyypin Stirling-moottori kytkettynä prosessivesiputkistoon.

Hönkähöyryjen hyödyntämiseksi voidaan ajatella asetelma, jossa höyryä johdettaisiin syöttövesisäiliön putkiyhteestä Stirling-moottorin lämpimän sylinterin (kuvassa punaisella) lämmönvaihtimien ohi. Kuvassa on esitelty tapaus, jossa Alfa-typin moottoriin johdetaan höyryä termisen kaasunpoiston jälkeen. Moottorin regeneraattori on kuvattu vihreällä ja kylmä sylinteri sinisellä. Erilaisten hönkähöyryjen tai poistoilmavirtojen hyödyntämiseen sopisivat kaikki Stirling-moottorityypit, jos lämpötilatasot lämpimässä päässä ovat yli 100°C. (Kuva 22)



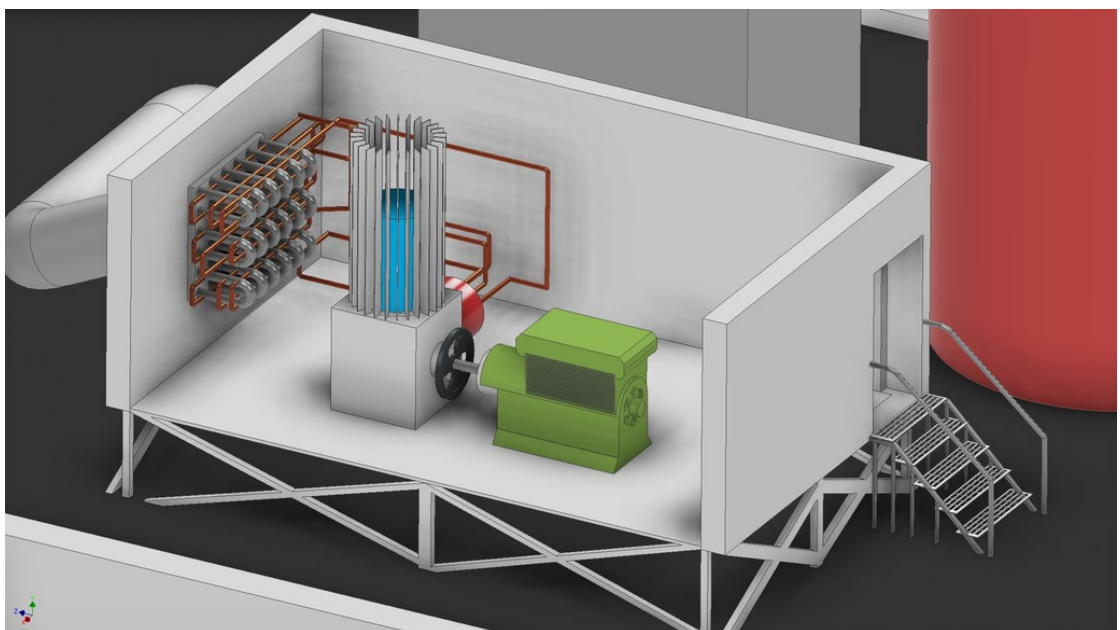
Kuva 22. Alfa-typin Stirling-moottori kytkettynä syöttövesisäiliöön.

Kuvassa 23 on mallinnettu kytkentä savukaasuista lämmön talteenoton yhteydessä tai suoraan savukaasuista. Jäähdytys/kylmä puoli ulkoilmalla. Jos lämmön talteenotossa kaukolämpövaihe, kannattavampaa voi olla tehdä sähköä kesällä. Savukaasuista otettaessa lämpöä on huomioita mahdollinen lämmönsiirtopintojen likaantuminen. Tämä vaatisi lisäteknikkaa ja huoltotoimenpiteitä, jotta lämmönsiirto ja hyötysuhde ei huonontuisi.



Kuva 23. Stirling-moottori savukaasujen lämmöntalteenoton yhteydessä.

Savukaasujen hyödyntämiseen sopiva ratkaisu voisi olla erillinen "kontti"-ratkaisu, josta löytyisi esimerkiksi putkistolämmönsiirtimet, Stirling-moottori ja generaattori mittaus- ja säätölaitteineen (kuva 24). Tämänkaltaista mahdollisuutta esiteltiin luvussa 3 ja se voisi sopivia pienelle lämpölaitokselle, joka haluaisi laajentaa toimintaansa sähköntuotantoon ja jolla ei olisi mietitty lämmöntalteenottoa.



Kuva 24. Modulaarinen Stirling-järjestelmä.

Kytkentämahdollisuuksia on kaikkialla, missä on hukkalämpövirtoja sekä lämpönieluja ja niitä ei ole muuten hyödynnetty. Näitä tapauksia on muuallakin kuin teollisissa ympäristöissä, kuten rakennuksissa, mutta ne eivät välttämättä ole Stirling-tekniikalla hyödynnettävissä johtuen laitteistojen rakenteellisista vaatimuksista ja lämpövirtojen riittämättömistä tasoista.

6.5 Johtopäätökset sähköntuotannon kannattavuudesta

Koska tehonsäätö on hidasta ja hankalaa Stirling-moottoreilla, olisi sähköntuotannon kannalta järkevää valita käyttösovellukseksi tasainen prosessi, jossa on ennustettavat arvot ja halutaan tiettyä sähkötehoa. Matalaenergisen lämmön potentiaalia on teollisuudessa hukkalämpövirtojen puolesta, joten käyttövoimaa on saatavilla Stirling-prosessille.

Laskelmien mukaan tarvitaan yli 400 °C lämpötilaero, jotta saadaan 60 %:n terminen hyötysuhde. Tämä voisi vastata kirjallisuudesta todettua 20 %:n sähköhyötysuhdetta. Virtauksien voidaan ajatella olevan riittäviä, jos lämpötilatoteutuvat.

Kytkentämahdollisuuksien puolesta voisi teollisissa ympäristöissä olla mielenkiintoista tutkia mahdollisuuksia hyödyntää isojen laitteistojen poistoilma- ja jäähdytysvirtauksia, metalliteollisuuden uuneja, sellutehtaan soodakattilan pohjatuhkan lämpöä ja erityisesti ydinvoimalan jäähdytysvesiä, koska kesällä hukkalämmöstä on ylitarjontaa. Sama pätee jätteenpolttolaitoksiin.

Jos sähkön hinta pysyy korkealla ja Stirling-moottoreita käytetään vuodessa tarpeeksi, voi kannattavuus ja takaisinmaksuaika nousta hyväksyttävälle tasolle. Tarvitsee kuitenkin ottaa huomioon, löytyykö laitteistoille sopivaa infrastruktuuria. Voi olla, että tehtailla sopivissa käyttökohteissa ei ole mahdollista rakentaa tai asentaa uutta ja mahdollisesti painavaa laitteistoa, joka vaatisi myös lisälaitteistoja ja -putkistoa. Myös mahdolliset tehonsäätöä lisäävät komponentit saattaisivat lisätä mekaanisia häviöitä, jotka huonontaisivat myös sähköhyötysuhdetta. Nämä seikat voivat muuttua, kun valmistusmenetelmät ja materiaalit kehittyvät.

Luvussa 4. esiteltujen tietojen mukaan matalaenergisien lämmön lähteitä on paljon eri lämpötilatasoissa, jotka voisivat olla Stirling-tekniikalla mahdollisesti hyödynnettävissä. Energian määrät ovat myös mittavia, etenkin lauhdevoimalaitoksilta. Sähköntuotannon kysyntä kasvaa ja pieniläkin hyötysuhteilla matalalämpöisistä lähteistä voitaisiin ehkä tuottaa suuria määriä sähköä Stirling-moottoreilla. Jos teollisuudessa tarvitaan prosessien sähköistämistä, Stirling-tekniikalla voitaisiin tätä parantaa käyttämällä niitä osana prosessien kiertoa. Hukkalämmön hyödyntämistä kuitenkin vielä tällä hetkellä ei suositella ensisijaisesti sähköntuotannossa. Sähköntuotantoon hukkalämmön tapauksissa suositellaan ORC-prosessia.

Voidaan todeta, että tällä hetkellä ei vaikuta kannattavalta tuottaa sähköä Stirling-moottorilla matalaenergisestä lämmöstä. Luvussa 5. mainitun tekniikan kehityksen valossa kiinnostusta asiaan löytyy maailmanlaajuisesti ja tutkimukset ovat lupaavia. Työssä olevien laskelmien mukaan hyödyntämispotentiaalia on, mutta tarvitaan enemmän tilastoja isompien kokoluokkien käytöstä sähköntuotannossa kaupallisissa sovelluksissa. Tämänlaiset tapaukset voivat tulla kysymykseen, kun tarve hyödyntää ylijäämä- ja hukkalämpövirtoja kasvaa tulevaisuudessa ja tarve tuottaa sähköä kasvaa yhteiskunnassa ja etenkin teollisuudessa. Kannattavuutta voi myös kasvattaa lisääntyvä tarve omavaraiseen, päästöttömään ja mahdollisesti hajautettuun energiantuotantoon Suomessa, esimerkiksi EU:n direktiivien ja sopimusten ohjaamana tai kansainvälisten kriisitilanteiden takia.

7 YHTEENVETO

Työn tekemisen haasteena oli laaja aihepiiri ja suuri lähdemateriaalin määrä. Kuitenkaan suomenkielisiä julkaisuja ei löydy monia ja jotkin termit ja asiat eivät ole hyvin käännettävissä. Teoria on myös vaativaa. Laskelmat ovat arvioita ja niihin tulee suhtautua kriittisesti. Kuitenkin tavoitteissa onnistuttiin ja työ toimii lyhyenä katsauksena Stirling-tekniikan kehitykseen ja matalaenergisien lämmön hyödyntämiseen sähköntuotannossa tällä hetkellä. Tämä on kuitenkin alustava katsaus aiheeseen ja lisää tutkimusta vaaditaan. Suomessa asiaa voitaisiin tutkia lauhdevoima- ja jätteenpolttolaitosten hukkalämmön hyödyntämiseen kesäkaudella, jolloin kaukolämmön kysyntä on alhaisimmillaan ja hukkalämpöä on tarjolla. Toinen varteenotettava tutkimusaihe olisi tutkia Stirling-

moottoreita osana jotain isompaa kiertoa, esimerkiksi moottorivoimaloissa tai voimalaitoksissa parantamassa kokonaisprosessin sähköhyötysuhdetta tai sähköistämässä jotakin teollista prosessia.

Stirling-moottorit ovat syrjäytyskoneita, jotka toimivat rauhallisesti ja osittain siksi muistuttavat todellista Carnot'n lämpövoimakonetta. Teorian mukaan voidaan päästä korkeisiin termisiin hyötysuhteisiin, jos lämpötilaero on riittävä. Toisaalta, jos käyttövoimana on aina saatavilla olevaa ja ilmaista hukka- tai ylijäämälämpöä, voitaisiin ehkä joustaa lämpötilasoista ja hyötysuhteiden saavuttamisesta, jos sähköä voidaan kuitenkin saada tarvittavalla teholla. Teknologian joustavuus eri käyttökohteissa ja -sovelluksissa on jo käytännössä todistettu.

Tällä hetkellä Stirling-tekniikka ei ole kannattava vaihtoehto hukka- ja ylijäämälämmön hyödyntämiselle. Moottorien hyötysuhteet ovat parantuneet, mutta teknologian suorituskyky ei riitä takaamaan kaupallista sähköntuotantoa. Hukkalämmön hyödyntämiselle suositetaan muita vaihtoehtoja, kuten kaukolämpöä tai muiden lämmityssovellusten käyttöä sekä ORC-prosessia sähköntuotannossa. Tällä hetkellä nämä näyttävät olevan Stirling-tekniikkaa parempi vaihtoehto.

Kuitenkin on mielenkiintoista ajatella tulevaisuutta ja maailman tilannetta. Ilmastomuutosta pyritään hidastamaan ja energiantuotantoa muutetaan hiilidioksidivapaaksi ja muutenkin päästöttömäksi. Uusia ideoita halutaan tukea ja erilaisia pilotointihankkeita syntyy. Stirling-tekniikalla on pitkä historia ja tutkimus menee vieläkin eteenpäin. On mielenkiintoista nähdä, nouseeko tämä vanha teknologia muiden vakiintuneiden energiantuotantomuotojen rinnalle, kun energian kysyntä nousee ja yhteiskunta sähköistyy samalla, kun ilmastotoimet ja kiertotalous lisääntyy.

LÄHTEET

AFRY. 2020. Energiatehokkuusdirektiivin mukainen selvitys hukkalämmön potentiaalista ja kustannushyötyanalyysi tehokkaasta lämmityksestä. Raportti työ- ja elinkeinoministeriölle. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://tem.fi/documents/1410877/2897650/EEDselvitys+l%C3%A4mmityksest%C3%A4_loppu-raportti+2020.pdf/88a0e63b-e2b6-eef9-1b4c-8c5411a0e531/EEDselvitys+l%C3%A4mmityksest%C3%A4_loppura-portti+2020.pdf?t=1601627038073. [Viitattu 13.02.2022].

Alaphilippe, M., Bonnet, S. & Stouffs, P. 2007. Low Power Thermodynamic Solar Energy Conversion: Coupling of a Parabolic Trough Concentrator and an Ericsson Engine. Artikkel. International journal of thermodynamics. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/42539906_Low_Power_Thermodynamic_Solar_Energy_Conversion_Coupling_of_a_Parabolic_Trough_Concentrator_and_an_Ericsson_Engine. [Viitattu 13.01.2022].

Boles, M. & Çengel, Y. 2015. Thermodynamics: an engineering approach. 8. Painos. New York: McGraw-Hill Education.

Bumataria, R. & Patel, N. 2013. Stirling engine performance prediction using Schmidt analysis by Considering different losses. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/276321024_stirling_engine_performance_prediction_using_schmidt_analysis_by_considering_different_losses. [Viitattu 20.09.2021].

Carlsen, H. 2005. Stirling engines for biomass – what's the problem? Teoksessa ISEC 2005 (toim.) Proceedings of 12th international Stirling engine conference and technology exhibition. Durham: Durham university, 38–47.

Cole, M. 2018. It keeps going and going: Stirling engine test sets long-duration record at NASA Glenn. *Space flight insider*. Artikkel. Saatavissa: [It keeps going and going: Stirling Engine test sets long-duration record at NASA Glenn - SpaceFlight Insider](https://www.spaceflightinsider.com/2018/09/14/stirling-engine-test-sets-long-duration-record-at-nasa-glenn/). [Viitattu 14.09.2021].

Czán, A., Glváč, A. & Sedlák, J. 2018. Design of a Stirling engine operating at low temperature difference. Artikkel. MATEC web of conferences. EDP Sciences. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/323753117_Design_of_stirling_engine_operating_at_low_temperature_difference. [Viitattu 24.11.2021].

Durcansky, P., Nosek, R. & Jandacka, J. 2020. Use of Stirling engines for waste heat recovery. Artikkel. MDPI. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.mdpi.com/1996-1073/13/16/4133?type=check_update&version=2. [Viitattu 25.11.2021].

Energiatallisuus. 2021. Vähähiilisuuden tiekartta. Powerpoint-esitys. Saatavissa: https://energia.fi/files/4946/Energia-alan_vahahiilisyystiekartta_2020.pdf. [Viitattu 14.01.2022].

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2018/2001.

Erol, D., Yaman, H. & Doğan, B. 2017. A review development of rhombic drive mechanism used in the Stirling engines. *Renewable and sustainable energy reviews*. Artikkel. PDF-dokumentti. Elsevier Ltd. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/316937935_A_review_development_of_rhombic_drive_mechanism_used_in_the_Stirling_engines. [Viitattu 20.10.2021].

Hemilä, S. & Utriainen, J. 1989. Lämpöoppi. Jyväskylä: Fysiikan kustannus Oy.

Hirata, K. & Kawada, M. 2005. Development of a multi-cylinder Stirling engine. Teoksessa ISEC 2005 (toim.) Proceedings of 12th international Stirling engine conference and technology exhibition. Durham: Durham University, 315–324.

Kirillov, N. & Vedmich, E. 2005. Theoretical basis of making Stirling cooler machines of moderate chill. Teoksessa ISEC 2005 (toim.) Proceedings of 12th international Stirling engine conference and technology exhibition. Durham: Durham University, 178–182.

Kuosa, M., Kaikko, J. & Koskelainen, L. 2006. The impact of heat exchanger fouling on the optimum operation and maintenance of the Stirling engine. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431106002432>. [Viitattu 08.02. 2022].

Kuosa, M., Kaikko, J. & Koskelainen, L. 2005. Conversion of gas-fired cogeneration Stirling engine into using biomass fuel. Teoksessa ISEC 2005 (toim.) Proceedings of 12th international Stirling engine conference and technology exhibition. Durham: Durham University, 132–143.

Kuosa, M., Saari, K., Kankkunen, A & Tveidt, T.-M. 2012. Oscillating flow in a stirling engine heat exchanger. Elsevier Ltd. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431112001925>. [Viitattu 10.02.2022].

Larson, L. 2005. Stirling development at Kockums. Teoksessa ISEC 2005 (toim.) Proceedings of 12th international Stirling engine conference and technology exhibition. Durham: Durham university, 1–10.

Lazaar, K. & Boutammachte, N. 2022. Development of a new technique of waste heat recovery in cement plants based on Stirling engine technology. Tiivistelmä. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431122002745>. [Viitattu 18.03.2022.]

Lepola, P. & Makkonen, M. 2009. Materiaalit ja niiden käyttö. 3.–6. Painos. Helsinki. WSOYpro Oy.

Martini, W. 1983. Stirling Design manual. 2. Painos. Richland. Martini engineering.

Masser, R., Khodja, A., Scheunert, M., Schwalbe, K., Fischer, A., Paul, R. & Hoffman, K. 2020. Optimized Piston Motion for an Alpha-Type Stirling Engine. Artikkel. MDPI. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.mdpi.com/1099-4300/22/6/700?type=check_update&version=1. [Viitattu 10.03.2022].

Motiva Oy. 2013. Tuotannon hukkalämpö hyödyksi. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/8501/Tuotannon_hukkalampo_hyodyksi.pdf [Viitattu 05.01.2022].

Motiva Oy. 2014. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen. Ylijäämälämpöenergia-analyysit. Raportti. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/13515/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Ylijaamalampoenergia-analyysit.pdf. [Viitattu 05.01.2022].

Motiva Oy. 2014. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen. Lämpöpumppu- ja ORC-sovellukset. Raportti. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/10217/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Lampopumppu- ja_ORC-sovellukset.pdf. [Viitattu 05.01.2022].

Organ, A. 2007. The air engine. Stirling cycle power for a sustainable future. Cambridge. Woodhead Publishing.

Organ, A. 2014. Stirling cycle engines. Inner workings and design. E-kirja. John Wiley & Sons, Ltd. Saatavissa: <https://kaakkuri.finna.fi/> [Viitattu 26.11.2021].

Qiu, S. & Solomon, L. 2018. Free-piston Stirling engine generators. Artikkel. *IntechOpen*. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.intechopen.com/chapters/62541>. [Viitattu 27.02. 2022].

Ross, A. 1997. Making Stirling Engines. 3. Painos. Ross experimental.

Ross, B. & Dudenhofer, J. 1991. Stirling machine operating experience. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19910016196/downloads/19910016196.pdf>. [Viitattu 28.03.2022].

Sedlák, J., Glváč, A. & Czán, A. 2017. Design of stirling engine operating at low temperature difference. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.mateconferences.org/articles/mateconf/abs/2018/16/mateconf_mms2018_04003/mateconf_mms2018_04003.html. [Viitattu 06.01.2022].

Smith, L., Nuel, B., Weaver, S., Berkower, S., Weaver, S. & Gross, B. 25 kW low-temperature Stirling engine for heat recovery, solar and biomass application. PDF-dokumentti. https://www.ohio.edu/mechanical/stirling/ISEC_papers/ISEC2016-CoolEnergy.pdf. [Viitattu 06.01.2022].

Stirling Cryogenics. 2021. Verkkosivu. Saatavissa: <https://www.stirlingcryogenics.eu/en/the-stirling-cycle> [Viitattu 12.11.2021].

Stirling International. 2021. Verkkosivut. Saatavissa: <http://www.stirlinginternational.org/default.asp>. [Viitattu 10.08.2021].

Swedish Stirling. 2021. Verkkosivut. Saatavissa: <https://swedishstirling.com/>. [Viitattu 13.11.2021].

Urieli, I. 2020. Stirling cycle machine analysis. Ohio University. Verkkosivut. Saatavissa: <https://www.ohio.edu/mechanical/stirling/>. [Viitattu 29.11.2021].

Waste heat. 2022. Waste heat utilization. Verkkosivu. Saatavissa: <https://www.waste-heat.eu/about-waste-heat/waste-heat-utilization>. [Viitattu 20.02.2022].

White, M. 2005. Combining best in free-piston and kinematic Stirling-engines. Teoksessa ISEC 2005 (toim.) Proceedings of 12th international Stirling engine conference and technology exhibition. Durham: Durham university, 17–29.