

**LÄMPÖSÄHKÖISTEN MATERIAALIEN
HYÖDYNTÄMINEN HYBRIDISÄHKÖAUTON
MIKROKAASUTURBIINIGENERAATTORIN
HUKKALÄMMÖN TALTEENOTOSSA**
**Applying thermoelectric materials to recover waste
heat from hybrid electric vehicle's micro gas
turbine generator**
Juho Rouvinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT
LUT School of Energy Systems
Sähkötekniikka

Juho Rouvinen

Lämpösähköisten materiaalien hyödyntäminen hybridisähköauton mikrokaasuturbiinigeneraattorin hukkalämmön talteenotossa

2020

Kandidaatintyö.

36 s.

Tarkastaja: Professori Juha Pyrhönen

Työssä selvitetään lämpösähköisten materiaalien (thermoelectric materials) käytön mahdollisuuksia hybridisähköauton mikrokaasuturbiinigeneraattorin hukkalämmön talteenotossa ja siten hybridisähköauton kokonaishyötysuhteen parantamisen keinona. Työn tarkoituksena on selvittää, kuinka lämpösähkögeneraattori (thermoelectric generator) fyysisesti toteutettaisiin, kuinka lataussähkö siirretään hybridisähköauton LTO-akkuun ja mikä on lämpösähkögeneraattorin kustannus.

Työ toteutetaan kirjallisuuskatsauksena siten, että siinä perehdytään lämpösähköisten materiaalien ominaisuuksiin, ilmiöihin ja kaupallisiin tuotteisiin. Perehdytään myös aikaisempiin tutkimuksiin liittyen autojen lämpösähkögeneraattoreihin ja selvitetään aikaisempien tutkimusten perusteella potentiaalisia toteutusvaihtoehtoja lämpösähkögeneraattorille hybridisähköauton tapauksessa.

Työssä esitetään lämpösähkögeneraattorin suunnittelun kannalta olennaisimpia yhtälöitä ja materiaalien ominaisuuksia sekä termosähköisten moduulien (thermoelectric modules) valmistajia ja kaupallisten termosähköisten moduulien tyypillisiä ominaisuuksia. Työssä esitetään yksinkertainen esimerkki pakoputkeen asennettavan lämpösähkögeneraattorin mitoituksesta ja rakenteesta. Yhtenä vaihtoehtona lämpösähkögeneraattorilla tuotetun sähkön siirtämiseksi akkuun on esitetty tasavirtahakkurin käyttämistä lämpösähkögeneraattorin ja akun välillä. Lämpösähkögeneraattorin kustannus on helposti useita satoja euroja pelkästään termosähköisten moduulien takia. Sarjatuotannolla kustannuksia voitaisiin todennäköisesti vähentää merkittävästi.

Lämpösähkögeneraattorin toteutus vaatii merkittävää jatkokehitystä ja perehtymistä teknologiaan. Tätä varten hybridijärjestelmän toimintatapa tulee tietää tarkemmin, jotta lämpösähkögeneraattori voidaan optimoida materiaalien, tehon ja hyötysuhteen kannalta.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT
LUT School of Energy Systems
Electrical Engineering

Juho Rouvinen

Applying thermoelectric materials to recover waste heat from hybrid electric vehicle's micro gas turbine generator

2020

Bachelor's Thesis.

36 p.

Examiner: Professor Juha Pyrhönen

In the study, thermoelectric materials are examined in waste heat recovery to improve the conversion efficiency within a hybrid electric vehicle's micro gas turbine generator system. The main goal is to investigate how a thermoelectric generator can be physically applied, how the thermoelectric generator electricity can be transferred to the hybrid electric vehicle's LTO-battery and what is the total cost of the thermoelectric generator system.

The study is realized as literature review such, that the study examines the properties of thermoelectric materials, -effects and commercial products. The study examines earlier studies related with thermoelectric generators used in vehicles and reviews potential structures to be used with hybrid electric vehicle.

From the thermoelectric generator development point of view, the study discusses essential equations, material properties and thermoelectric module manufacturers and typical commercial thermoelectric module properties. A simple example of dimensioning a thermoelectric generator attached to a vehicle's exhaust pipe is given and a simple example of possible thermoelectric generator's structure is shown. As a one solution, a DC/DC-converter between thermoelectric generator and battery is proposed to transfer the generated electricity to LTO-battery. A thermoelectric generator's total cost is easily hundreds of euros alone with thermoelectric modules. With mass production the cost could be most likely reduced significantly.

The hybrid electric vehicle's thermoelectric generator requires further development and familiarizing with the technology. Before this, the hybrid system's working principle must be known more precisely to be able to optimize the thermoelectric generator's materials, power and efficiency.

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

1.	Johdanto.....	6
2.	Aikaisempaa tutkimustietoa	9
3.	Lämpösähköiset ilmiöt ja materiaalit	10
3.1	Perusteet	10
3.2	Ominaisuuksia	11
3.3	Kaupalliset termosähköiset moduulit	16
4.	Auton lämpösähkögeneraattorit.....	18
4.1	Kaasuturbiinigeneraattorin rakenne.....	18
4.2	Pakoputkiston lämpösähkögeneraattorit.....	20
4.2.1	Lämmönvaihdin.....	21
4.2.2	Jäähdytys	23
4.2.3	Ongelmat	24
4.3	Hybridisähköauton lämpösähkögeneraattori	25
4.4	Sähkön siirtäminen akkuun	28
4.5	Kustannukset	30
5.	Yhteenveto.....	31
	Lähteet	32

Liitteet

Liite 1: Aikaisempia tutkimuksia liittyen auton lämpösähkögeneraattoreihin

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

APU	Auxiliary Power Unit, kaasuturbiinigeneraattori
TC	Thermoelectric Couple, lämpöpari
TEG	Thermoelectric Generator, lämpösähkögeneraattori
TM	Thermoelectric Module, lämpösähköinen moduuli
KPK	korkeapainekompressori
KPT	korkeapaineturbiini
LTO	Lithium Titanate Oxide, litium titanaatti oksidi
MPK	matalapainekompressori
MPT	matalapainetubiini
A	pinta-ala [m^2]
P	teho [W]
\hat{P}	huipputeho [W]
q_m	massavirta [kg/s]
Q	lämpövirta [W]
\dot{Q}	lämpövirran tiheys [W/m^2]
R	resistanssi [Ω]
R_{th}	lämpöresistanssi [$^{\circ}C/W$ tai K/W]
T	lämpötila [$^{\circ}C$ tai K]
ΔT	lämpötilaero [$^{\circ}C$ tai K]
U	jännite [V]
Z	hyvyyskerroin [m/A]
ZT	lämpötilasta riippuva hyvyyskerroin
α	Seebeck-kerroin [V/K]
η	hyötysuhde
λ	lämmönjohtavuus [W/Km]
ρ	sähköresistiivisyys [Ωm]

Alaindeksit

AB	lämpöpari
L	load, kuorma
TEG	Thermoelectric Generator, lämpösähkögeneraattori

1. JOHDANTO

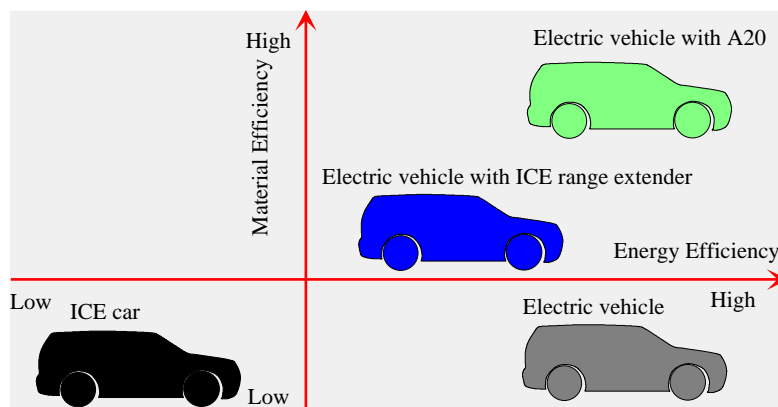
Suomen tieliikenteessä kuluu vuosittain yhteensä noin 45 TWh:n edestä fossiilisia polttoaineita, mukaan lukien polttoaineisiin sekoitetut bio-osuudet (Tilastokeskus 2017). Tästä osuudesta ainoastaan noin 10 TWh menee hyötykäyttöön ja loput 35 TWh muuttuu hukkalämmöksi. Sähköautoilla Suomen tieliikenteen energiamäärä putoaisi vain noin 10 TWh:iin johtuen sähköauton paremmasta hyötysuhteesta (Motiva 2017). Sähkö voidaan tuottaa uusiutuvasti esimerkiksi tuuli-, aurinko- tai vesivoiman avulla, jolloin sähköauton ajonaikaiset päästöt ovat teoriassa nolla. Sähköautojen yleistymisessä on kuitenkin vastassa monia ongelmia, mitkä tekevät sähköautojen globaalista yleistymisestä kyseenalaista.

Ensimmäisenä ongelmana on akkujen heikko energiatiheys verrattuna esimerkiksi bensiiniin, jolla energiatiheys on 12 kWh/kg, kun sähköauton akulla vastaava luku on 0,1 kWh/kg (Motiva 2017). Tämä johtaa kompromissiin sähköauton toimintamatkan ja auton painon ja kustannusten välillä. Lisäksi sähköautojen toimintamatka tunnetusti lyhenee kylmissä olosuhteissa, millä voi olla merkittävä vaikutus sähköauton käytettävyyteen esimerkiksi Suomen haja-asutusalueella.

Maailmassa valmistetaan vuosittain 100 miljoonaa henkilöautoa ja 20 miljoonaa kuorma-autoa. Akkujen valmistusta pitäisi kasvattaa radikaalisti, jos autojen valmistuksessa siirrytään täyssähköautojen valmistukseen. Jos sähköautojen toimintamatka pyritään pitämään lähelläkään polttomoottoriauton tasoa, tarkoittaisi tämä henkilöautoille 100 kWh:n ja kuorma-autoille 500 kWh:n akkua. Vuositasolla valmistettava akkukapasiteetti olisi tällöin 20 TWh, mikä johtaisi vuosittain 3000 miljoonan tonnin hiilidioksidipäästöihin. Laskussa on oletettu, että akkujen valmistamisessa syntyy päästöjä keskimäärin 150 CO₂kg/kWh (ICCT 2018 ; Emilsson & Dahllöf 2019). Vertailun vuoksi koko EU:n vuosittaiset päästöt ovat 4500 miljoona tonnia.

Nykyinen akkuteknologia perustuu litiumin ja erinäisten metallien yhdistelmään. Litium itsessään ei varsinaisesti ole harvinainen materiaali ja on arvioitu, että maailman litium varannot riittäisivät kattamaan nykyisen globaalin autokannan sähköistämisen (ICCT 2018). Akkujen valmistuksessa käytettävien metallien kuten esimerkiksi koboltin saatavuudesta saataisi sen sijaan muodostua ongelma sähköautojen yleistyessä (Emilsson & Dahllöf 2019). Vaikka akkuteknologiaa tutkitaan ja kehitetään jatkuvasti, ei uutta akkuteknologiaa ole nähtävillä markkinoilla lähitulevaisuudessa.

Perinteisellä polttomoottorilla varustetulla hybridisähköautolla toimintamatkaa voidaan pidentää, mutta tällöin menetetään osa sähköauton hyvästä hyötysuhteesta. Toisaalta se mikä menetetään hybridiauton hyötysuhteessa, voitetaan osittain materiaaleissa; hybridiauton pienempi akku suhteessa sähköautoon säästää akkumateriaalia ja siten valmistuksenaikaisia hiilidioksidipäästöjä. Eräs vaihtoehto polttomoottoreiden ja täyssähköauton rinnalle on biokaasulla toimiva hybridisähköauto, joka käyttää perinteisen mäntäpolttomoottorin sijaan hyvällä hyötysuhteella toimivaa kaasuturbiinigeneraattoria (APU, Auxiliary Power Unit). Teoreettisten tarkastelujen mukaan APU:lla on saavutettavissa yli 40 % terminen hyötysuhde. APU ei ainoastaan vähennä polttoaineen kulutusta ja päästöjä, mutta myös valmistamiseen kuluvia resursseja järjestelmän rakenteen ja käytettävien materiaalien ansiosta. Esimerkiksi APU:lla varustetun sähköauton akuksi riittää arviolta vain 10 kWh LTO-akku (Lithium Titanite Oxide battery). Kuvassa 1 havainnollistetaan erilaisten autojen materiaalitehokkuutta ja hyötysuhdetta.



Kuva 1 Autojen hyötysuhde ja materiaalitehokkuus eri voimanlähteille. Vaaka-akselilla on hyötysuhde ja pystyakselilla materiaalitehokkuus. ICE: Internal combustion engine, polttomoottori. A20: APU 20 kW_e. (Kuva: Juha Pyrhönen)

APU:lla Suomen tieliikenteen ajonaikaiset päästöt putoaisivat käytännössä nolnaan, kun puolet ajosuoritteesta tehtäisiin uusiutuvasti tuotetulla sähköllä ja puolet biokaasulla tai sähkösynteettisellä kaasulla. Tällöin Suomen tieliikenteen verkkosähkön osuudeksi tulisi APU:lla kokonaisuudessaan noin 5 TWh ja biokaasun osuudeksi APU:n 40 % hyötysuhteella 12,5 TWh. Suomessa biokaasun tuotantopotentiaalia on arviolta 10 TWh, josta tällä hetkellä hyödynnetään vain 4 % (Gasum 2020).

Polttomoottoria korkeammasta hyötysuhteesta huolimatta 20 kW_e:n APU tuottaa 30 kW hukkalämpöä, jota voidaan vain rajallisesti hyödyntää auton lämmityksessä. Tämän työn tavoitteena on selvittää, millä tavoin lämpösähkögeneraattoria voitaisiin hyödyntää APU:n

hukkalämmön talteenotossa ja osana hybridijärjestelmää. Työ toteutetaan tutkimalla TEG teknologian kehitystä ja nykytilaa, tarkastelemalla jo olemassa olevaa tutkimustietoa TEG teknologian käytöstä tieliikennesovelluksissa ja selvittämällä markkinoilla olevia TEG järjestelmiä. Työssä käytetään apuna seuraavia tutkimuskysymyksiä:

- Miten APU:n TEG järjestelmä fyysisesti toteutetaan?
- Miten sähkö siirretään ajoakkuun, jonka jännite on luokkaa 400 V?
- Kuinka paljon järjestelmä maksaa?

Toisessa luvussa esitetään aikaisempaa tutkimustietoa autojen lämpösähkögeneraattoreista. Kolmannessa luvussa käsitellään TEG teknologian perusteita ja esitetään lämpösähkögeneraattoreiden toimintaperiaate, ominaisuuksia ja ominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä ja kaupallisia tuotteita. Neljännessä luvussa esitetään hybridisähköauton kaasuturbiinigeneraattorin rakenne ja toimintaperiaate, käsitellään autojen lämpösähkögeneraattoreita aikaisemman tutkimustiedon pohjalta, pohditaan työn hybridisähköauton lämpösähkögeneraattorin toteutusta ja rakennetta, pohditaan generoidun sähkösiirtämistä hybridiauton akkuun ja arvioidaan TEG järjestelmän kokonaiskustannuksia. Viidennessä ja siten viimeisessä luvussa pohditaan työn jatkokehitystä.

2. AIKAISEMPAA TUTKIMUSTIETOA

Auton lämpösähkögeneraattoreita on tutkittu vuosikymmeniä. Ensimmäisiä tutkimuksia tehtiin jo 1960 luvulla Yhdysvalloissa, jossa testattiin lyijytelluurin käyttöä lämpösähköisenä materiaalina. Kyseisen tutkimuksen tuloksena rakentui lämpösähkögeneraattori, joka tuotti 514 W sähkötehon 80 km/h kulkevalle ajoneuvolle (Shan et al. 2019). Autojen lämpösähkögeneraattoreita on alettu tutkimaan varsin laajasti 2000-luvun aikana ja erityisesti viimeisten kymmenen vuoden aikana. Mielenkiinto lämpösähkögeneraattoreita kohtaan johtuu potentiaalisesta polttoainekulutuksen ja päästöjen vähentämisestä. Monet suuret autovalmistajat kuten BMW, Ford, Renault ja Honda ovat tutkineet teknologiaa ja testanneet prototyyppinä uusia automalleja varten (Jaziri et al. 2019).

Autojen lämpösähkögeneraattoreiden tutkimus on keskittynyt hyvin vahvasti auton pakoputkistoon asennettaviin lämpösähkögeneraattoreihin. Auton jäähdyttimeen asennettavaa lämpösähkögeneraattoria on myös testattu ja tutkimuksen tulokset ovat vertailukelpoiset pakoputkiston lämpösähkögeneraattorien kanssa (Jaziri et al. 2019). Lämpösähkögeneraattoreiden tyypillinen teho on kymmenistä satoihin watteihin ja parhaimmillaan jopa yli kilowatin luokkaa (Shan et al. 2019 ; Jaziri et al. 2019 ; Brito et al. 2020).

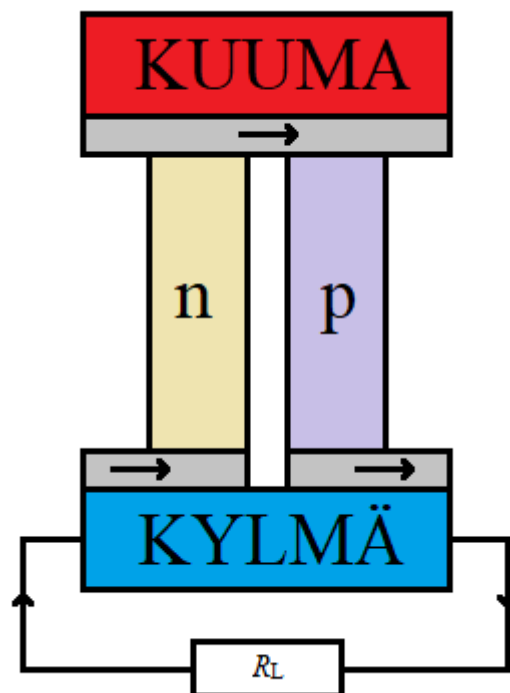
Liitteeseen 1 on koottu aikaisempia tutkimuksia liittyen autojen lämpösähkögeneraattoreihin. Lisää lukemisen arvoista tietoa autojen lämpösähkögeneraattoreista on esimerkiksi (Shan et al. 2019) ja (Jaziri et al. 2019) tekemissä tutkimuksissa, joihin on koottu kattavasti aikaisempaa tutkimustietoa.

3. LÄMPÖSÄHKÖISET ILMIÖT JA MATERIAALIT

Tässä luvussa käsitellään lämpösähkögeneraattorin perusteita. Luvussa esitetään lämpösähkögeneraattoreiden suunnittelun kannalta olennaisimpia yhtälöitä ja esitetään lämpösähköisten materiaalien tyypillisiä ominaisuuksia.

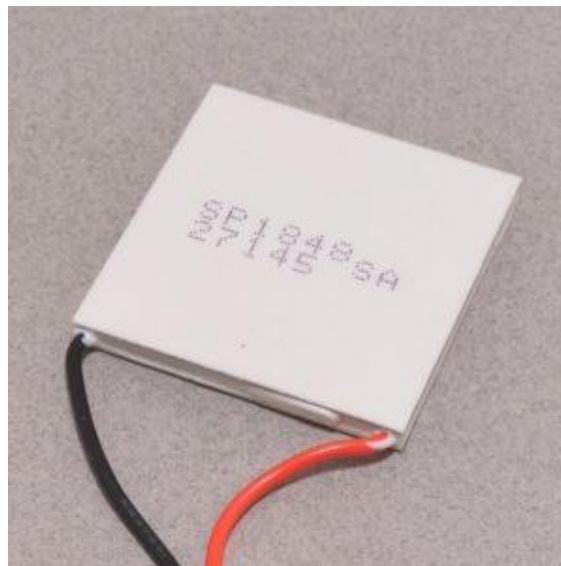
3.1 Perusteet

Lämpösähkögeneraattori (TEG, thermoelectric generator) on puolijohteista valmistettu laite, joka muuntaa lämpöenergiaa sähköksi. Lämpösähkögeneraattori perustuu Seebeck-ilmiöön, puolijohteiden lämpösähköisiin ominaisuuksiin ja lämpöparin (TC, thermocouple) toimintaan. Lämpöpari koostuu n- ja p-tyyppin puolijohteista, joiden päät on kytketty toisesta päästä yhteen kuvan 2 mukaisesti. Kun puolijohteiden (lämpöparin) päiden välillä vallitsee lämpötilaero, puolijohteiden lämpösähköiset ominaisuudet ja Seebeck-ilmiö saavat aikaan jännitteen päiden välillä. Kun lämpöpari kytketään ulkoiseen kuormaan, syntyy sähkövirta lämpöparin ja kuorman lävitse.



Kuva 2 Lämpöparin rakenne. Lämpöpari on asennettu kuuman ja kylmän pinnan välille. Nuolet osoittavat sähkövirran suunnan. R_L on lämpöpariin kytketty ulkoinen kuorma.

Yksittäisen lämpöparin muodostama jännite ja teho on pieni ollakseen käyttökelpoinen käytännön sovelluksissa, minkä takia lämpöpareja kytketään useita sarjaan. Tällä tavoin lähtöjännite ja siten myös teho saadaan kasvamaan (Jaziri et al. 2019). Tällaista lämpöparien sarjaankytkettyä komponenttia kutsutaan termosähköiseksi moduuliksi (TM tai TEM, thermoelectric module). Termosähköinen moduuli on usein sellaisenaan lämpösähkögeneraattorina käytettävä konkreettinen laite, joka sisältää kymmeniä tai jopa satoja lämpöpareja. Kaupalliset moduulit koostuvat usein lämpöparien päälle asennetuista levyistä, tai siten rungosta, kuten esimerkiksi kuvan 3 termosähköinen moduuli. Termosähköisten moduulien kuuma puoli tai -pinta (hot side) asennetaan lämmönlähteeseen ja kylmä puoli tai -pinta (cold side) pois päin lämmönlähteestä. Varsinainen lämpösähkögeneraattori, kuten esimerkiksi auton pakoputkeen tarkoitettu laite, sisältää tavallisesti useita sarjaan- ja/tai rinnankytkettyjä termosähköisiä moduuleja (Jaziri et al. 2019).



Kuva 3 Tyypillinen kaupallinen termosähköinen moduuli. (Kuva: BC-Robotics 2020)

3.2 Ominaisuuksia

Lämpösähkögeneraattoreiden ja termosähköisten moduulien ominaisuudet riippuvat pitkälti lämpöparien puolijohdemateriaaleista. Voidaan sanoa, että ei ole olemassa yhtä oikeaa moduulia, joka kävisi jokaiseen sovellukseen, vaan termosähköiset moduulit ovat ennen kaikkea sovelluskohtaisia.

Lämpösähköisten materiaalien tehokkuutta mitataan hyvyyskerroimella Z [m/A], joka määritellään yhtälöllä (Jaziri et al. 2019)

$$Z = \frac{\alpha}{\rho\lambda}, \quad (1)$$

missä α on puolijohteen Seebeck-kerroin [V/K], ρ on sähköresistivisyys [Ωm] ja λ on lämmönjohtavuus [W/Km]. Hyvyyskerroin Z kertoo, kuinka tehokkaasti lämpösähköinen materiaali muuntaa lämpöä sähköksi. Materiaalien Seebeck-kertoimet vaihtelevat lähteittäin ja kirjallisuudesta löytyy useita eri arvoja materiaalille. Tämä johtuneen siitä, että Seebeck-kerroin muuttuu lämpötilan funktiona ja eri lähteet voivat ilmoittaa materiaalien Seebeck-kertoimet eri lämpötiloissa. Toisaalta materiaalien valmistustekniikka ja esimerkiksi se, kuinka puolijohdet dopataan puolijohdeissa, vaikuttaa Seebeck-kertoimeen (Han et al. 2017). Taulukossa 1 on esitetty eräiden puolijohdemateriaalien Seebeck-kertoimia.

Hyvyyskerroin voidaan ilmoittaa absoluuttisessa lämpötilassa, jolloin otetaan huomioon lämpötilan vaikutus materiaalin ominaisuuksiin (Jaziri et al. 2019):

$$ZT = \frac{\alpha^2}{\rho\lambda} T, \quad (2)$$

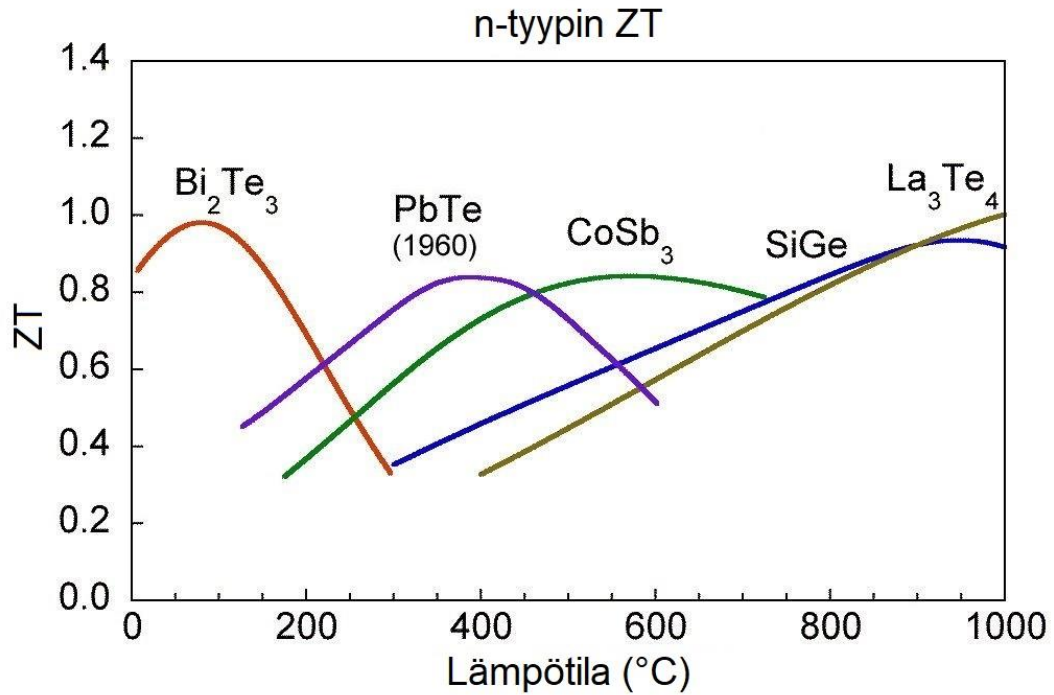
missä T [K] on lämpösähköisen materiaalin absoluuttinen lämpötila. ZT -kerrointa voidaan pitää materiaalien kannalta Z -kerrointa parempana tehokkuuden mittarina, koska materiaalien ominaisuudet muuttuvat radikaalisti lämpötilan funktiona, kuten kuvissa 4 ja 5 on esitetty. Taulukossa 1 on esitetty tyypillisten lämpösähköisten puolijohdemateriaalien ZT -kertoimia sekä materiaalien optimaaliset käyttölämpötila-alueet.

Taulukko 1 Lämpösähköisiä puolijohdemateriaalia ryhmiteltynä käyttölämpötila-alueittain. Taulukko on uudelleenkirjoitettu (Jaziri et al. 2019) lähteestä.

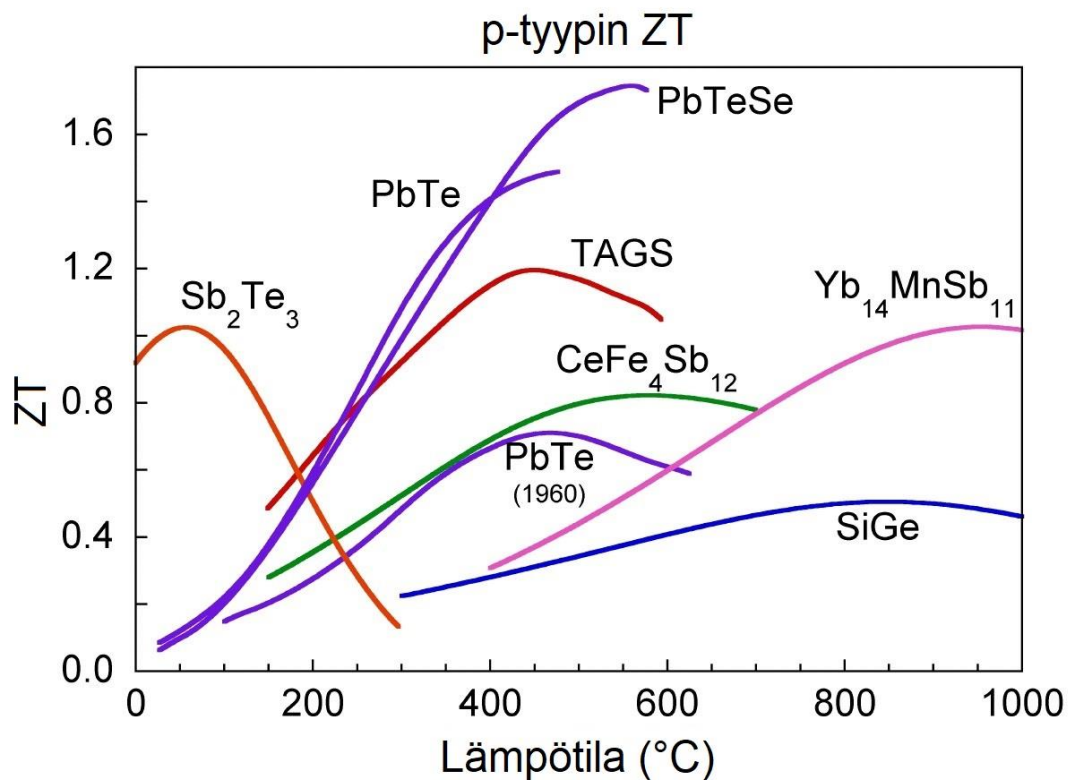
Ryhmä	Materiaali	Puolijoh- teen tyyppi	Optimaali- nen yläläm- pötila-alue [K]	ZT huip- puarvo	α [$\mu\text{V/K}$]
Korkealämpö- tila 700 – 1000 K	CoSb ₃	n	650 – 1100	0.9	240 ¹⁾
	PbTe	n	600 – 850	0.8	-180 ²⁾
	SiG	n	>1000	0.9	-
	Zn ₄ Sb ₃	p	>600	1.4	-
	CeFe ₄ Sb ₁₂	p	>850	1.5	-
	SiGe	p	900-1300	0.5	-
	TAGS (Te/Sb/Ge/Ag)	p	650-800	1.3	-
	CeFe ₃ RuSb ₁₂	-	-	-	-
	Mg ₂ Si	n	645	1.1	-
Keskilämpö- tila 400 – 700 K	Tl ₉ BiTe ₆	p	>400	1.3	-
Matalalämpö- tila 300 – 400 K	Bi ₂ Te ₃	n	<350	0.7	-230 ²⁾
	Bi ₂ Te ₃	p	<450	1.1	230 ¹⁾
	(Bi,Sb) ₂ Te ₃	p	375	1	300 ²⁾

¹⁾ (Lee 2017)

²⁾ (Lasance 2016)

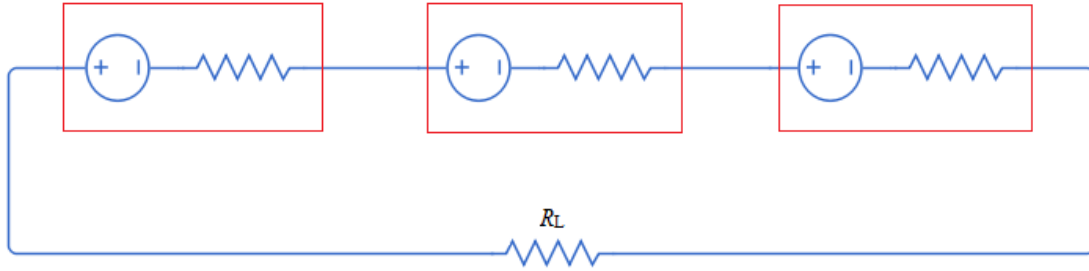


Kuva 4 N-tyyppin puolijohdemateriaalien ZT-kertoimia lämpötilan funktiona. Kuva on muokattu (Thermoelectrics 2020) lähteestä.



Kuva 5 P-tyyppin puolijohdemateriaalien ZT-kertoimia lämpötilan funktiona. Kuva on muokattu (Thermoelectrics 2020) lähteestä.

Termosähköisillä moduuleilla on sisäresistanssi kuten monilla muilla aktiivisilla ja passiivisilla sähkökomponenteilla. Sisäresistanssi riippuu sarjaankytkettyjen lämpöparien resistanssista ja kappalemäärästä kuvan 6 mukaisesti (Jaziri et al. 2019). Tavallisesti termosähköisten moduulien valmistajat ilmoittavat moduulin sisäresistanssin arvon, jolloin koko lämpösähkögeneraattorin kokonaisresistanssi voidaan laskea yksinkertaisella piirilaskennalla ja termosähköisten moduulien sisäresistanssien sarjaan- ja rinnankytkennästä.



Kuva 6 Termosähköisen moduulin sijaiskytkentä. Punainen laatikko esittää yksittäistä lämpöparia, joka koostuu tasajännitelähteestä ja sisäresistanssista. R_L on piiriin kytketty ulkoinen kuorma.

Termosähköisen moduulin lähtöjännite riippuu lämpöparien lukumäärästä, moduulin yli valitsevasta lämpötilaerosta ja moduulin materiaalin ominaisuuksista. Moduulin lähtöjännite saadaan yhtälöstä (Jaziri et al. 2019)

$$U_{\text{TEG}} = N\alpha_{\text{AB}}\Delta T, \quad (3)$$

missä N on sarjaan kytkettyjen lämpöparien lukumäärä, α_{AB} on lämpöparin Seebeck-kerroin [V/K] ja ΔT on lämpöparin välinen lämpötilaero [K]. Valmistajat yleensä ilmoittavat termosähköisten moduulin lähtöjännitteen avoimelle piirille ja/tai moduulin ja kuorman yhteensovitetussa ($R_{\text{TEG}} = R_L$) tapauksessa.

Lämpösähkögeneraattorin tuottamalle sähköteholle P_{TEG} [W] voidaan kirjoittaa (Jaziri et al. 2019):

$$P_{\text{TEG}} = U_{\text{TEG}}^2 \frac{R_L}{(R_{\text{TEG}} + R_L)^2}, \quad (4)$$

missä R_{TEG} on lämpösähkögeneraattorin sisäresistanssi [Ω] ja R_L on kuorman resistanssi [Ω]. Lämpösähkögeneraattorin teho on suurimmillaan silloin, kun lämpösähkögeneraattorin

ja ulkoisen kuorman resistanssit ovat yhtä suuret. Tällöin lämpösähkögeneraattorin maksimiteholle \hat{P}_{TEG} [W] voidaan kirjoittaa (Jaziri et al. 2019)

$$\hat{P}_{\text{TEG}} = \frac{U_{\text{TEG}}^2}{4R_{\text{TEG}}} \quad (5)$$

Lämpösähkögeneraattorin teho riippuu siis termosähköisen moduulin puolijohteiden ominaisuuksista, moduulin pintojen välillä vallitsevasta lämpötilaerosta sekä ulkoisen piirin resistanssista suhteessa moduulin sisäresistanssiin. Lämpösähkögeneraattorin teho maksimoidaan valitsemalla sopivat materiaalit taulukon 1 ja kuvien 4 ja 5 mukaisesti eli käyttämällä termosähköisiä moduuleja, joilla on mahdollisimman korkea ZT-arvo käyttölämpötila-alueella, tehostamalla ja ylläpitämällä moduulin yli vallitsevaa lämpötilaeroa sekä sovittamalla lämpösähkögeneraattorin ja ulkoisen kuorman resistanssit yhteen.

Lämpövirta Q [W] on termosähköisen moduulin ominaisuus, joka kertoo, kuinka paljon lämpötehoa moduulin lävitse virtaa. Vastaavasti lämpövirran tiheys \dot{Q} [W/m²] osoittaa lämpövirran moduulin pinta-alaa kohden. Termosähköinen moduuli tuottaa lämpövirrasta sähkötehoa, jonka suuruus riippuu moduulin hyötysuhteesta, eli siitä, kuinka suuren osan lämpövirrasta moduuli pystyy muuntamaan sähköksi. Hyötysuhde määritellään yhtälöllä (Jaziri et al. 2019):

$$\eta_{\text{TEG}} = \frac{P_{\text{TEG}}}{Q_{\text{TEG}}}, \quad (6)$$

missä Q_{TEG} on moduulin lävistävä lämpövirta [W]. Yleensä valmistajat ilmoittavat moduulin lämpövirran tai lämpövirran tiheyden arvon. Vastaavasti valmistajat voivat ilmoittaa lämpöresistanssin R_{th} [W/K] arvon, jonka avulla moduulin lämpövirta ja siten lämpövirran tiheys voidaan laskea.

3.3 Kaupalliset termosähköiset moduulit

Taulukossa 2 on lueteltu termosähköisten moduulien valmistajia ja jälleenmyyjiä sekä esimerkkejä moduulien ominaisuuksista.

Taulukko 2 Termosähköisten moduulien valmistajia ja jälleenmyyjiä sekä esimerkkejä tyypillisistä kauppallisista moduuleista.

Valmistaja ja moduulin nimike	Koko [mm ³]	Käyttölämpötila [°C]	U_{TEG} [V] $R_L = R_{TEG}$	P_{TEG} [W] $R_L = R_{TEG}$	η_{TEG} [%]	R_{th} [K/W]
Align Sourcing LLC G-127-14-16-L-S	40x40x3.9	-40 – 150 jatkuva	2.2	2.42	-	-
AMS Technologies AG TGM-127-1.4-2.5	40x40x4.8	<200 max	2.5	1.63	3.2	2.23
Custom Thermoelectric 1261G-7L31-10CX1	56x56x4.4	<320 max	4.39 avoin piiri	16.2	-	-
Crystal Ltd H-071-14-11-L2	30x30x3.8	<150 jatkuva	1.54	1.84	3.94	2.14
Ecogen TGM-127-1.0-2.5	30x30x4.8	<200 jatkuva	3.7	2.30	5.40	5
European Thermodynamics Limited GM250-49-45-25	62x62x5.3	<250 max	4.1 avoin piiri	15.24	4.88**	0.71**
EVERREDtronics Limited TEG032-50HT	50x50x10	<550 jatkuva	2.4	26	7*	-
Hi-Z Technology, Inc. HZ-14	64x60x5.1	<250 jatkuva	1.5	15	3.6**	0.47**
KELK ltd. High Performance Type	52x55x4.4	<280 max	15*	23*	7*	1.048
KRYOTHERM TGM-199-1.4-3.5	40x40x6	<200 jatkuva	5.6	4.9	5.5*	2.4
Marlow TG12-6-01L	40x40x4	<230 max	9.51 avoin piiri	6.16	5.03	1.47
Merit Technology Group TEG1-12630-2.6	30x30	<230 max	4.3	2.6	4.3**	3.33**
P&N Technology TEG-127020	40x44x3.3	<200 jatkuva	4.27	8.5	-	-
Taicang TE cooler Co., Ltd TEP1-24105	40x40	200*	4	1.6	-	-
TECTEG CMO-32-62S	65x65x8.6	<800 jatkuva	6.4	12.3*	-	-
TEGpro TE-MOD-10W4V-40	40x40x5	<330 jatkuva	4	9.8	6.5*	1.44**
Thermonamic Electronics TELBP1-12656-0.45	56x56	<360 jatkuva	4.6	21.7	6.9*	1.30**

* Arvot eivät ole tarkkoja lukemia. Valmistaja ei ole määritellyt mittauspistettä tai arvot on luettu valmistajan kaaviosta.

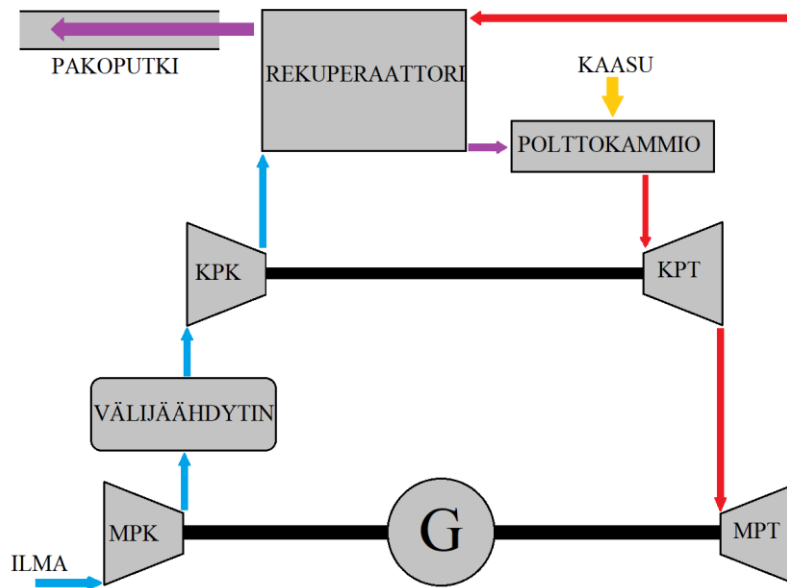
** Arvot on laskettu valmistajan ilmoittamilla arvoilla

4. AUTON LÄMPÖSÄHKÖGENERAATTORIT

Tässä luvussa käsitellään autojen lämpösähkögeneraattoreita ja pohditaan lämpösähkögeneraattorin toteutusta hybridisähköauton tapauksessa. Ensimmäisessä kappaleessa esitetään kaasuturbiinigeneraattorin rakenne ja lämpösähkögeneraattorin suunnittelun kannalta olennaiset parametrit. Toisessa kappaleessa käsitellään aiempaa tutkimustietoa liittyen auton pakoputkiston lämpösähkögeneraattoreihin. Kolmannessa, neljännessä ja viidennessä kappaleessa pohditaan hybridisähköauton lämpösähkögeneraattorin toteutusta, sähkön siirtoa akkuun ja lämpösähkögeneraattorin kustannuksia.

4.1 Kaasuturbiinigeneraattorin rakenne

Hybridiauton kaasuturbiinigeneraattori eli APU on LUT yliopistossa kehitettävä auton hybridijärjestelmä, joka käyttää polttoaineena polttonestettä tai -kaasua, kuten esimerkiksi metaania. APU:n rakenne on esitetty kuvassa 7. APU koostuu kahdesta akselistä, jossa kummassakin on kompressori- ja turbiinijuokupyörä. Ensimmäiseen akseliin on kytketty matalapainekompressori (MPK), matalapaineturbiini (MPT) sekä sähkögeneraattori. Toiseen akseliin on kytketty korkeapainekompressori (KPK) sekä korkeapaineturbiini (KPT). Matalapainekompressori ahtaa tuloilman välijäähdyttimen kautta korkeapainekompressorille, josta ahdettu ilma kulkee lämmönvaihtimen (rekuperaattori) kautta polttokammioon. Polttokammioon syötetään poltettava kaasu. Sieltä ilman ja kaasun palamistuotteet kulkevat korkeapaineturbiinin kautta matalapaineturbiinille. Jäljelle jääneellä lämmöllä esilämmitetään tuloilma lämmönvaihtimessa (rekuperaattori) ja johdetaan tämän jälkeen pakoputkistoon.



Kuva 7 Kaasuturbiinigeneraattorin rakenne. MPK: matalapaineturbiini. KPK: korkeapainekompressor. KPT: korkeapaineturbiini. MPT: matalapaineturbiini.

Lämpösähkögeneraattorin kannalta on mielenkiintoisinta tutkia sellaisia järjestelmän osia, joissa lämpötilaero ulkolämpötilaan on suuri ja joissa muodostuu hukkalämpöä. Ensimmäinen tällainen järjestelmän osa on pakokanava, johon kaikki lämmönvaihtimesta (rekuperaattori) jäljelle jäänyt lämpö johdetaan. Lähtötietoina tiedetään, että pakokaasujen lämpötila rekuperaattorin jälkeen on noin $T_{\text{pakokaasu}} = 210 \text{ }^\circ\text{C}$. Jos termosähköiset moduulit asennettaisiin esimerkiksi suoraan pakoputkiston pinnalle, moduulien pintojen välille olisi teoriassa mahdollista muodostaa $185 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilaero, jos moduulien kylmä pinta jäädytettäisiin $25 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilaan. Pakokanavaan asennettava lämpösähkögeneraattori on siten yksi potentiaalinen vaihtoehto.

Toinen potentiaalinen järjestelmän osa on matalapaineturbiinin sisääntulo. Matalapaineturbiinin akselille kytketty sähkögeneraattori täytyy suojata ja eristää turbiinin korkeasta lämpötilasta. Tämä voitaisiin toteuttaa lämpösähkögeneraattorilla, jolla jäädytettäisiin turbiinin tulo lämpötilaa generoiden samalla sähköä. Tämä ei kuitenkaan ole vaihtoehto, koska turbiinin teho ja hyötysuhde laskisivat kaasun jäähtymisen seurauksena. Siten sähkögeneraattori täytyy eristää muilla keinoilla kuin lämpösähkögeneraattorin avulla.

Kolmas vaihtoehto on asentaa lämpösähkögeneraattori välijäähdyttimen yhteyteen. MPK:n jälkeen lämpötila on noin 80 – 100 °C eli esimerkiksi jos moduulien kylmä pinta olisi 25 °C lämpötilassa, moduulin pintojen välille olisi mahdollista saavuttaa 55 – 75 °C lämpötilaero. Tässä voitaisiin käyttää matalan lämpötilan termosähköisiä moduuleja eli esimerkiksi Bi₂Te₃:stä valmistettuja moduuleja. Välijäähdyttimen tapauksessa ongelma on kuitenkin matala lämpötila verrattuna esimerkiksi järjestelmän pakokanavaan, jossa lämpötila on yli kaksinkertainen välijäähdyttimeen nähden. Tämä tarkoittaisi sitä, että välijäähdyttimen lämpösähkögeneraattori tarvitsisi teoriassa yli kaksinkertaisen määrän termosähköisiä moduuleja tuottaakseen saman tehon kuin pakoputkeen asennettava lämpösähkögeneraattori. Tämä taas nostaisi lämpösähkögeneraattorin kustannuksia huomattavasti.

Selkeästi ainoa toteutuskelpoinen ja kustannustehokas vaihtoehto on järjestelmän pakoputkistoon asennettava lämpösähkögeneraattori, jota käsitellään seuraavissa kappaleissa. Lähtötietoina lämpösähkögeneraattorin suunnittelussa käytetään seuraavia parametrejä:

- Massavirta $q_m = 0,11 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$
- Pakokaasujen lämpötila lämmönvaihtimen jälkeen $T_{\text{pakokaasu}} = 210 \text{ °C}$

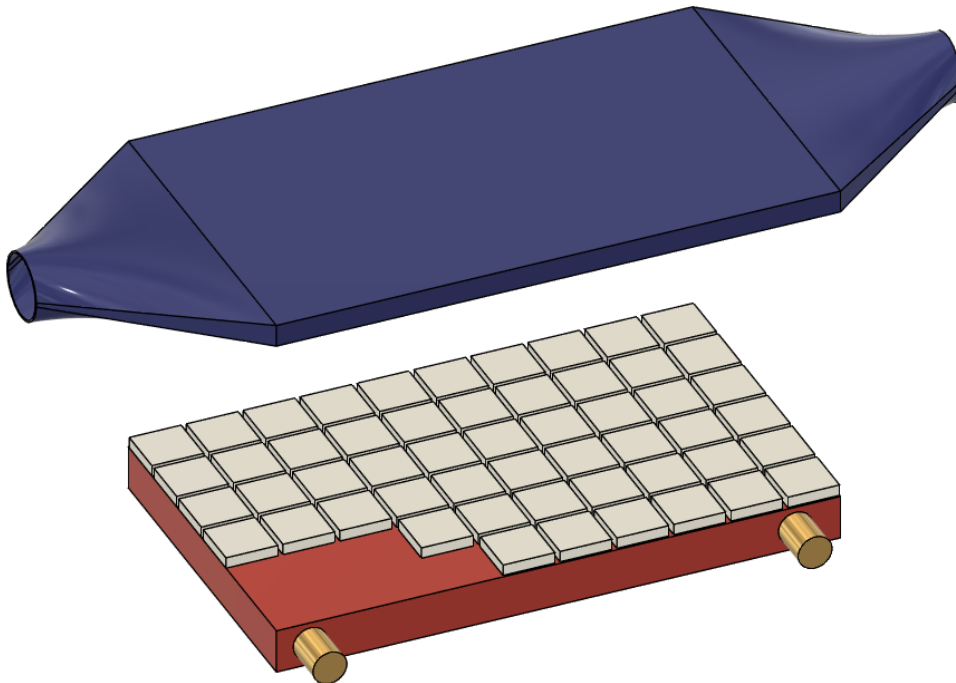
Lisäksi hybridijärjestelmästä tiedetään, että LTO-akun jännite on noin 400 V.

4.2 Pakoputkiston lämpösähkögeneraattorit

Aikaisempien tutkimusten pääpaino on ollut pakoputkistoon asennettavissa lämpösähkögeneraattoreissa. Lämpösähkögeneraattorit koostuvat lämmönvaihtimesta, jolla pakokaasujen lämpö siirretään termosähköisten moduulien kuumalle pinnalle, ja jäähdyttimestä, jolla moduulien kylmää pinta jäähdytetään. Lämmönvaihdin toimii yleensä lämpösähkögeneraattorin runkona, johon kaikki muut generaattorin vaatimat osat kiinnitetään. Lämmönvaihdin voi olla yksinkertaisuudessaan pakokanava, jonka pinnalle termosähköiset moduulit asennetaan. Lämmönvaihtimen rakenteessa ei ole yhtenäistä linjaa, vaan monia eri rakenteita ja tekniikoita on testattu niin hyvällä kuin huonolla menestyksellä. Jäähdytys on toteutettu joko vesikierrolla, liittämällä jäähdytys auton jäähdytinnestekiertoon tai puhaltimilla. Myös lämpöputkia on testattu yhdessä puhaltimien kanssa (Orr et al. 2017). Lämmönvaihtimen ja jäähdytyksen avulla pyritään saavuttamaan mahdollisimman suuri lämpötilaero termosähköisten moduulien pintojen välille lähtötehon maksimoimiseksi.

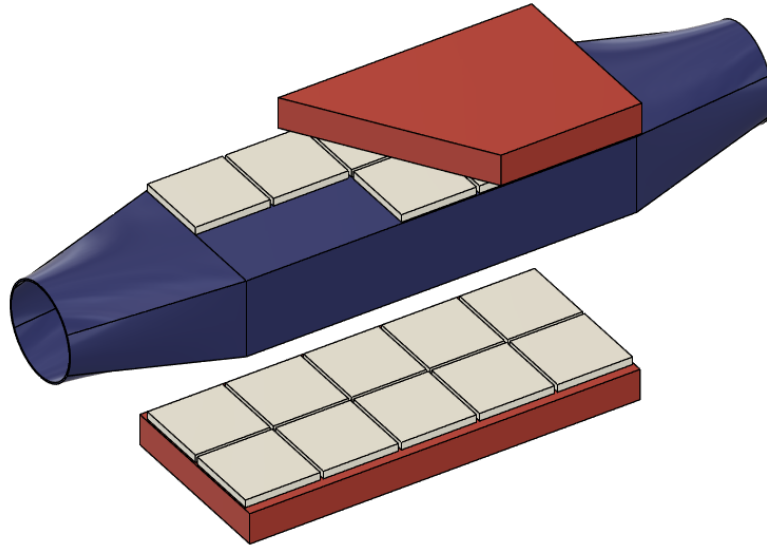
4.2.1 Lämmönvaihdin

Lämmönvaihtimen tarkoitus on tehostaa ja ylläpitää termosähköisten moduulien kuuman pinnan lämpötilaa. Epäilemättä yksinkertaisin vaihtoehto on asentaa termosähköiset moduulit suoraan pakokanavaan. Tätä varten pakoputkistoon asennetaan lämmönvaihdin, jonka pinnalle moduulit asennetaan. Lämmönvaihdin voi olla yksinkertaisuudessaan sopivan muotoinen pakokanava, jonka pinnalle moduulit on helppo kiinnittää. Lämmönvaihtimen muotoina on testattu muun muassa suorakaiteen, sylinterin ja kuusikulmion muotoja, sekä eräänlaista integroitua rakennetta (Zhang et al. 2015). Lämmönvaihtimen tehokkuutta pyritään kasvattamaan pakokanavan muotoilulla ja esimerkiksi käyttämällä lämpöä johtavia rivoituk-
sia pakokanavan sisällä. Kuvissa 8-11 on esitetty tyypillisten lämpösähkögeneraattoreiden ulkoisia rakenteita. Tyypillisesti tällaisten lämpösähkögeneraattoreiden hyötysuhde on alle 2 % ja parhaimmillaan yli 3 % (Kumar et al. 2013). Lähtötehot ovat tyypillisesti kymmenistä satoihin watteihin, ja joissakin tapauksissa jopa yli kilowatin luokkaa (Zhang et al. 2015 ; Liu X. et al. 2015).



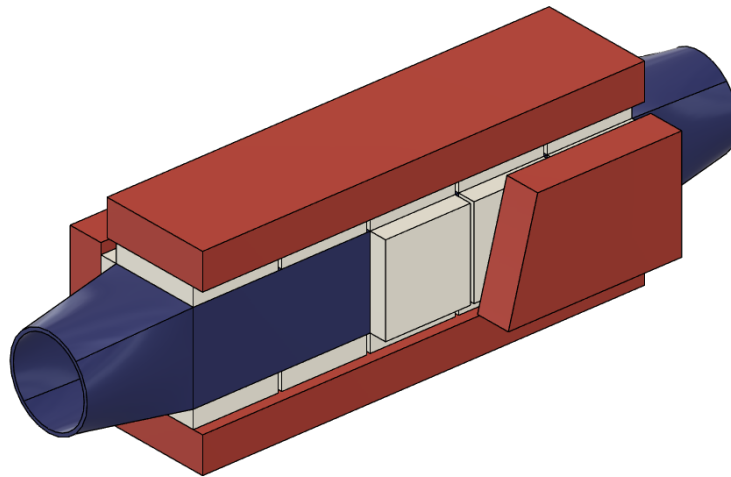
Kuva 8

Esimerkki pakoputkeen asennettavasta lämpösähkögeneraattorista. Termosähköiset moduulit (kuvassa vaalealla) on asennettu yhteen tasoon lämmönvaihtimen (kuvassa sinisellä) ja jäähdyttimen (kuvassa punaisella) väliin. Pakokaasut kulkevat lämmönvaihtimen pakokanavan lävitse muodostaen moduulien kuuman pinnan. Moduulien jäähdytys tapahtuu esimerkiksi nesteellä, joka kiertää jäähdyttimen sisällä kuvan keltaisten liitäntöjen kautta. Kuva on hahmotelma eikä ole oikeassa skaalassa. Kuva perustuu (Crane et al. 2012) prototyyppiin.



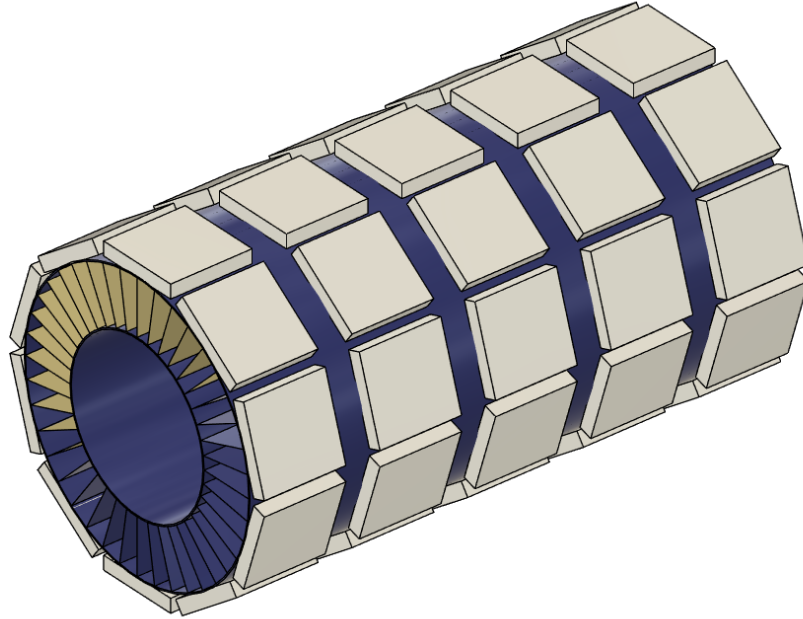
Kuva 9

Esimerkki pakoputkeen asennettavasta lämpösähkögeneraattorista. Termosähköiset moduulit (kuvassa vaalealla) on asennettu kahteen tasoon suorakulmaisen lämmönvaihtimen (kuvassa sinisellä) vastakkaisille pinnoille. Pakokaasu kulkee lämmönvaihtimen lävitse muodostaen moduulien kuuman pinnan. Moduulien jäähdyttimet (kuvassa punaisella) on asennettu moduulien kylmälle pinnalle. Jäähdytys tapahtuu esimerkiksi nesteellä tai ilmalla. Kuva on hahmotelma eikä ole oikeassa skaalassa. Rakennetta ovat käyttäneet esimerkiksi (Liu X. et al. 2015), (Massaquer et al. 2017) ja (Lan et al. 2018).



Kuva 10

Esimerkki pakoputkeen asennettavasta lämpösähkögeneraattorista. Termosähköiset moduulit (kuvassa vaalealla) on asennettu suorakaiteen muotoisen lämmönvaihtimen (kuvassa sinisellä) neljälle pinnalle. Pakokaasu kulkee lämmönvaihtimen lävitse muodostaen moduulien kuuman pinnan. Jäähdyttimet (kuvassa punaisella) on asennettu moduulien kylmälle pinnalle. Jäähdytys tapahtuu esimerkiksi nesteellä tai ilmalla. Kuva on hahmotelma eikä ole oikeassa skaalassa. Rakennetta on käyttänyt esimerkiksi (Stobart et al. 2017).



Kuva 11 Esimerkki pakoputkeen asennettavasta lämpösähkögeneraattorista. Termosähköiset moduulit (kuvassa vaalealla) on asennettu sylinterin mallisen lämmönvaihtimen (kuvassa sinisellä) ulkopinnalle. Lämmönvaihdin koostuu kahdesta sisäkkäisestä sylinteristä, joiden välissä on rivoitus. Pakokaasu kulkee normaalisti rivoitetussa osassa sylinterien välissä. Sisempi sylinteri toimii ohivirtausreitinä, jonka kautta pakokaasut ohjataan esimerkiksi ylikuumenemisen estämiseksi. Kuva on hahmotelma eikä ole oikeassa skaalassa. Kuva perustuu (Kumar et al. 2013) prototyyppiin.

Erillistä pakokanavan- ja termosähköisten moduulien lämmönvaihdinta on testannut ainakin (Brito et al. 2020). Prototyypin ideana on käyttää johtuvuussäätöviä lämpöputkia, joilla säädetään moduulien lämpötila ja aktiivisten moduulien lukumäärä. Tällä tavoin vältetään lämpösähkögeneraattorin ylikuumenemiselta ja termosähköiset moduulit ovat lähellä parasta lämpötila-aluetta hyötysuhteen näkökannalta. Prototyyppi suoriutui varsin hyvin testeissä; generaattorin hyötysuhde oli 4 % ja generoitu sähköteho yli 1 kW. Prototyypin tehokkuutta rajoittaa tällä hetkellä termosähköisten moduulien hyötysuhde ja paremmilla moduuleilla generaattorin teho todennäköisesti kasvaisi. (Brito et al. 2020)

4.2.2 Jäähdytys

Jäähdyttimen tarkoitus on jäähdyttää termosähköisten moduulien kylmää pintaa. Jäähdytyksen merkitys lämpösähkögeneraattorin toiminnan kannalta on yhtä tärkeä kuin lämmönvaihtimen toiminta. Vesi- ja ilmajäähdytys on yleisimmät käytetyt jäähdytyskeinot. Vesijäähdytystä suositaan ilmajäähdytystä useammin siksi, että nestejäähdytyksellä saadaan aikaiseksi suuri lämmönsiirtokyky ja sen vaatima pumppausteho on vaatimatonta. Nestejäähdytyksen

huonoina puolina on sen korkea hinta ja tilantarve. Tästä syystä lämpösähkögeneraattori kytetään useissa tapauksissa moottorin omaan jäähdytyskiertoon. Tällöin jäähdytysjärjestelmä tulee kuitenkin uudelleen suunnitella, jotta ylimääräinen jäähdytyskierto ei vaikuta moottorin tehoon. (Shan et al. 2019) Hybridisähköauton tapauksessa on mahdollista, että käytössä on esimerkiksi sähkömoottorin nestejäähdytys, jota voidaan hyödyntää lämpösähkögeneraattorin jäähdyttämiseksi. Taulukkoon 3 on koottu jäähdytystapojen vahvuuksia ja heikkouksia.

Taulukko 3 Eri jäähdytystapojen vahvuuksia ja heikkouksia. Taulukko on uudelleenkirjoitettu (Shan et al. 2019) lähteestä.

Jäähdytystapa	Vahvuudet	Heikkoudet
Ilmajäähdytys	-Yksinkertainen rakenne -Pieni tilantarve -Vaikuttaa vähän moottorin suorituskykyyn	-Rajallinen lämmönvaihtokyky -Suhteellisen suuri tehonkulutus
Vesijäähdytys	-Suuri lämmönsiirtokyky -Vaikuttaa vähän moottorin suorituskykyyn	-Suuri tilantarve -Kallis
Jäähdytys moottorin jäähdytysnesteellä	-Vähemmän ylimääräisiä osia - Suuri lämmönsiirtokyky	-Vaatii moottorin jäähdytyksen uudelleensuunnittelun

4.2.3 Ongelmat

Lämpösähkögeneraattoreiden yksi yleinen ongelma on lämmön epätasainen jakautuminen, eli tilanne, jossa yksittäisten moduulien yli vallitseva lämpötilaero vaihtelee moduulien kesken. Tämä johtuu esimerkiksi siitä, että pakokaasu jäähtyy kulkiessaan moduulien ohitse, jolloin yksittäisten moduulien kuumien pintojen välille muodostuu lämpötilaero. Lämpö ei siten jakaudu tasaisesti moduulien kesken, mikä aiheuttaa loishäviöitä ja laskee lämpösähkögeneraattorin lähtötehoa (Shen et al. 2019). Yksi ratkaisu ongelmaan on moduulien eristäminen ja lämmönvaihtimen ja jäähdyttimen pintojen eristämien toisistaan, millä vähennetään ylimääräisen lämmön siirtymistä moduulin kuuman ja kylmän pinnan välillä (Jaziri et al. 2019). Näillä eristyskeinoilla lähtöteho on kasvanut jopa 20 % (Jaziri et al. 2019).

Polttomootoriauton pakokaasun lämpötila vaihtelee tyypillisesti satoja celsiusasteita auton nopeuden ja kuorman mukaan (Crane et al. 2012). Lämpötilavaihtelut tulee ottaa huomioon lämpösähkögeneraattorin rakenteessa kestävyuden näkökulmasta. Lämpötila ei saa nousta yli termosähköisten moduulien sallitun ylärajalämpötilan, koska muuten moduulit voivat vaurioitua (Shan et al. 2019). Moduulit tulee valita siten, että ne kestävät korkeimman mahdollisen käyttölämpötilan. Koska moduulit valitaan kestävämmän korkein esiintyvä lämpötila, usein käy niin, että moduulit toimivat osan käyttöajasta epäedullisella ZT -alueella eli lämpösähkögeneraattorin hyötysuhde laskee (Shan et al. 2019).

Jänniteyhtälön 3 ja tehoyhtälöiden 4 ja 5 perusteella voisi kuvitella, että termosähköisten moduulien kappalemäärän kasvattaminen ratkaisisi teho-ongelmat ja että lämpösähkögeneraattorin teho kasvaisi samassa suhteessa moduulien kappalemäärään. On kuitenkin todettu, että lämpösähkögeneraattorin termosähköisille moduuleille on optimaalinen kappalemäärä, jolla saavutetaan paras teho/hinta suhde. Tietyn kappalemäärän jälkeen moduulien lisäämisellä ei ole enää suurta vaikutusta lämpösähkögeneraattorin tehoon, koska lämpö jakautuu yhä useamman moduulin kesken, jolloin yksittäisen moduulin teho laskee. Lisäksi tällöin lämpö jakautuu epätasaisemmin, mikä lisää loishäviöitä (Shen et al. 2019).

Hyvän kosketuspinnan ja lämpöreitin aikaansaaminen lämmönvaihtimen ja moduulin pinnan välille voi olla ongelmallista lämpölaajenemisen vuoksi. Lämpölaajeneminen tulee ottaa huomioon ja kompensoida esimerkiksi käyttämällä lämpöä johtavaa tahnaa pintojen välissä. Korkeissa lämpötiloissa tahnojen lämmönkestävyydessä voi olla ongelmia (Crane et al. 2009).

4.3 Hybridisähköauton lämpösähkögeneraattori

Lämpösähkögeneraattori voidaan toteuttaa monella eri tavalla rakenteellisesti, eikä generaattorin toteutukselle ole yhtä oikeaa tapaa. Aikaisempien tutkimusten perustella monella eri rakenteella on saatu hyviä tuloksia.

Työn tapauksessa kaasuturbiinigenaattoria suunnitellaan käytettäväksi vakioteholla, jolloin järjestelmän läpi virtaava lämpöteho pysyy lähes vakiona. Tällöin myös pakokaasun lämpötila pysyy oletettavasti tasaisena, eli moduulit voidaan valita toimimaan tehokkaimmin pakokaasujen lämpötilassa. Tällöin materiaalien osalta maksimoidaan lämpösähkögeneraattorin teho ilman riskiä siitä, että moduulit hajoaisivat ylikuumenemisen vuoksi.

Generaattorin rakenteena voidaan käyttää kuvien 8-12 tyyppistä yksinkertaista pakoputkistoon asennettavaa pakokanavaa (lämmönvaihdin), jonka pinnalle termosähköiset moduulit asennetaan. Lämmönvaihtimen fyysinen rakenne riippuu muun muassa käytettävästä olevasta tilasta, asennuspaikasta ja jäähdytyksen toteutuksesta. Jos esimerkiksi lämmönvaihtimen rakenteena käytetään suorakaiteen muotoista pakokanavaa, moduulien asennuspintana voidaan käyttää kaikkia pakonavan neljää sivua, kuten esimerkiksi kuvassa 10, tai asentaa moduulit vain yhdelle pinnalle ja lämpöeristää pakokanava muilta sivuilta kuten kuvassa 8. Moduulien sijoittelussa tulee ottaa huomioon jäähdytyksen toteutus ja kuinka jäähdytys saadaan kulkemaan moduulien kylmälle pinnalle. Aikaisemmissa tutkimuksissa on käytetty usein nestejäähdytystä suuren lämmönsiirtokyvyn takia, mutta yhtä hyvin jäähdytys voidaan toteuttaa myös ilmajäähdytyksenä. Puhaltimilla toteutetun ilmajäähdytyksen huonoina puolina on suhteellisen suuri tehontarve ja heikko lämmönsiirtokyky, mitkä ovat auton rajallisen tehon ja tilan takia ei-toivottuja ominaisuuksia. Puhaltimien sijasta auton ajonopeudesta riippuva ajoviima voisi olla potentiaalinen vaihtoehto lämpösähkögeneraattorin jäähdyttämiseksi erityisesti hybridisähköauton tapauksessa.

Ajoviima voitaisiin ohjata termosähköisten moduulien kylmälle pinnalle jäähdyttimen sopivalla rakenteella, asettelemalla lämpösähkögeneraattori sopivasti ajoviimaan nähden ja ohjaamalla ilmavirrat moduulien jäähdytettävälle pinnalle. Jäähdytyspinta-alaa voitaisiin kasvattaa esimerkiksi sopivalla alumiinirivoituksella. Korkealla ajonopeudella ajoviima todennäköisesti toimisi hyvin moduulien jäähdyttämisessä, mutta tätä vastoin alhaisella ajonopeudella, esimerkiksi taajamissa ajettaessa, ajoviimaan perustuva jäähdytys ei luultavasti toimisi. Tällöin moduulien lämpötilaero tasoittuisi ja lämpösähkögeneraattorin sähköteho romahtaisi. Tämä ei ole välttämättä ongelma työn hybridisähköauton tapauksessa johtuen auton käyttötavasta. Ajatuksena on, että ensimmäiset 50 kilometriä ajetaan esimerkiksi yön aikana ladatulla verkkosähköllä. Tämä toimintamatka riittää kattamaan suurimman osan taajamissa tapahtuvasta ajosta, jolloin kaasuturbiinigenaattori ei käynnisty ajon aikana ollenkaan. Sitä vastoin pidemmällä matkoilla kaasuturbiinigenaattori käynnistyy noin 50 ajokilometrin jälkeen, jolloin autolla ajetaan todennäköisesti taajaman ulkopuolella ja suuremmilla ajonopeuksilla. Eli tällöin jäähdyttävää ajoviimaa olisi käytössä silloin, kun lämpösähkögeneraattori sitä tarvitsisi. Hyvänä puolena ajoviima ei vaatisi ulkopuolista tehoa tosin kuin esimerkiksi nestejäähdytyksen nestekiertopumppu, ja jäähdytyksen rakenne ja materiaalien kustannukset olisivat todennäköisesti pienemmät kuin nestejäähdytyksellä. Huonoina

puolina jäähditys ja siten myös lämpösähkögeneraattori eivät toimisi alhaisissa nopeuksissa, mutta hybridin käyttötavan takia tämä ei välttämättä olisi ongelma.

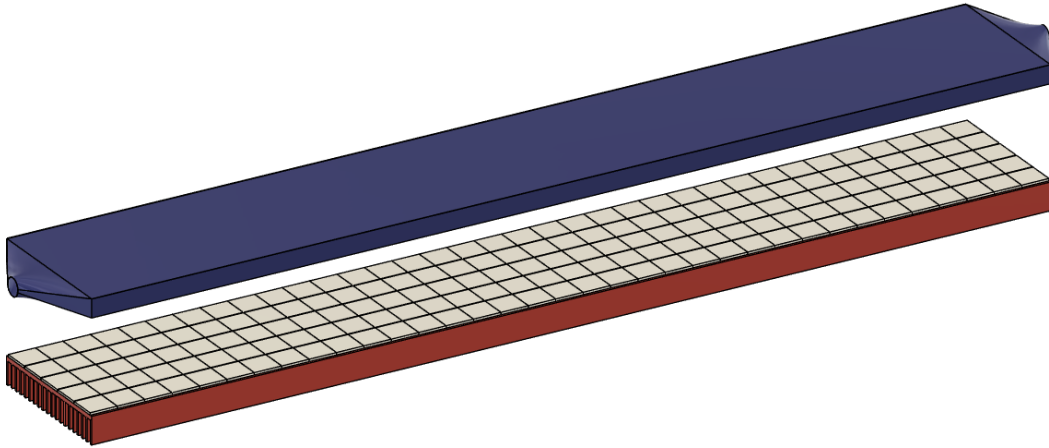
Esimerkki: APU:n pakokaasuissa on tehoa noin 30 kW. 4 %:n hyötysuhteella tästä olisi saatavissa noin 1.2 kW TEG-teho. Suunnitellaan järjestelmän pakokanavaan nimellisteholtaan $P_{\text{TEG}} = 1000 \text{ W}$ lämpösähkögeneraattori. Käytetään suorakaiteen muotoista ja litteää lämmönvaihdinta, jonka yhdelle sivulle termosähköiset moduulit asennetaan yhteen kerrokseen ja muut sivut lämpöeristetään. Moduulien jäähditys tapahtuu luontaisesti ajoviiman vaikutuksesta. Moduulien jäähdytettävälle pinnalle asennetaan rivoitettu alumiinilevy. Lämpösähkögeneraattori asennetaan auton pohjaan siten, että moduulien jäähdytettävä pinta on alaspäin ja ajoviima ohjataan kulkemaan jäähdyttimen ylitse.

Pakokaasujen lämpötila on lähtötietojen perusteella $T_{\text{pakokaasu}} = 210 \text{ °C}$. Oletetaan, että pakokaasujen lämpötila on moduulien kuuman pinnan keskilämpötila koko lämmönvaihtimen matkalla. Oletetaan lisäksi, että moduulien kylmä pinta jäähdytetään ja ylläpidetään valtiellä ajaessa $T_{\text{kylmä}} = 50 \text{ °C}$. Tällöin moduulien yli vallitse lämpötilaero on $\Delta T = 160 \text{ °C}$. Lämpötilan perusteella valitaan lämpösähkögeneraattoriin Hi-Z 9 termosähköiset moduulit. Arvioidaan valmistajan tiedoista, että moduulien lämpövirran tiheys 160 °C lämpötilassa on 4 W/cm^2 ja moduulin hyötysuhde 4 % (Hi-Z Technology 2020). Lämpösähkögeneraattorin suunniteltu 1000 W nimellisteho vaatii tällöin termosähköistä pinta-alaa:

$$A_{\text{TEG}} = \frac{P_{\text{TEG}}}{\dot{Q}_{\text{TEG}} \eta_{\text{TEG}}} \quad (7)$$

$$A_{\text{TEG}} = \frac{1000 \text{ W}}{4 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2} \times 4 \%} = 6250 \text{ cm}^2$$

Yhden moduulin koko on $60 \times 60 \text{ mm}$ ja pinta-ala 36 cm^2 , eli moduuleja tarvitaan 1000 W nimellistehoon yhteensä 175 kappaletta. Moduulit asennetaan lämmönvaihtimen pinnalle viiteen riviin, jolloin lämpösähkögeneraattorin ulkomitoiksi tulee noin $300 \times 2100 \text{ mm}$. Kuvassa 12 on esitetty lämpösähkögeneraattorin esimerkkirakenne.



Kuva 12 Esimerkki työn hybridisähköauton pakoputkeen asennettavasta lämpösähkögeneraattorista. Kuvassa sinisellä lämmönvaihdin, vaalealla termosähköiset moduulit ja punaisella jäähdytin.

Laskettu esimerkki on hyvin karkea esimerkki lämpösähkögeneraattorin suunnittelusta. Todellisuudessa moduulien kuumen pinnan lämpötila olisi jakautunut epätasaisesti, lämpötila olisi pakokaasua alemmassa lämpötilassa ja pakokaasujen lämpötila laskisi lämmönvaihtimen sisällä. Tämä aiheuttaisi loishäviöitä, jotka vaikuttaisivat suoraan lähtötehoon. Ajovii-man jäähdyttävä vaikutus tulisi laskea tarkemmin ja siten moduulien kylmän pinnan lämpötila eri ajonopeuksilla. Myös moduulien hyötysuhde ja lämpövirran tiheys täytyisi tuntea tarkemmin eri lämpötiloissa. Jos lämpösähkögeneraattorilla kuitenkin päästäisiin 1 kW:n tehoon, olisi sillä jo selvästi järjestelmän hyötysuhdetta parantava vaikutus. Hybridijärjestelmän teoreettinen hyötysuhde nousisi tällöin 40 %:sta 42 %:iin, eli hyötysuhde kasvaisi peräti 5 %.

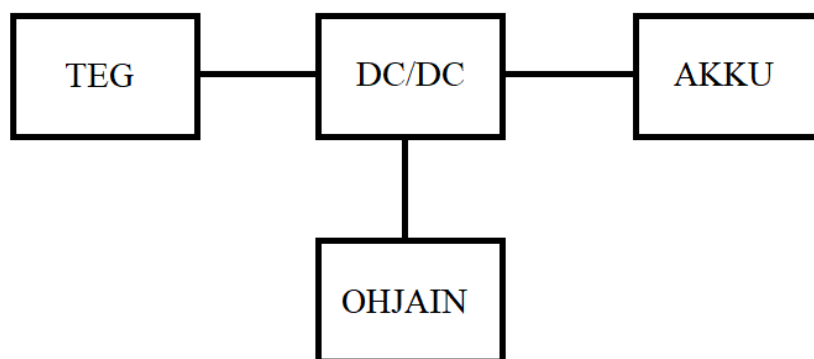
4.4 Sähkön siirtäminen akkuun

Hybridisähköauton tapauksessa lämpösähkögeneraattorilla tuotettu sähkö halutaan siirtää auton LTO-akkuun. Tätä varten lämpösähkögeneraattorin lähtöjännitteen tulee olla akun jännitettä korkeampi jokaisessa tilanteessa (Muralidhar et al. 2018). Työn hybridisähköauton tapauksessa LTO -akun jännite on 400 V luokkaa.

Lämpösähkögeneraattorin lähtöjännitteen suuruusluokka riippuu käytettävistä termosähköisistä moduuleista, sarjaankytkettyjen moduulien kappalemäärästä ja lämpösähkögeneraatto-

rin käyttölämpötila-alueesta. Aiemmin lasketun esimerkin tapauksessa, yksittäisen moduulin lähtöjännite on noin 2,1V, kun moduulin lämpötilaero on 160 °C ja kuorman ja moduulin resistanssit ovat yhtä suuret. Jos kaikki 175 moduulia kytketään sarjaan, lämpösähkögeneraattorin lähtöjännite on noin 390 V. Lämpösähkögeneraattorin jännitteen tulisi olla mieluiten akkujännitettä korkeampi, jolloin tavallisella step-down-hakkurilla saisi generoidun sähkön 400 V akkuun hyvällä hyötysuhteella. Todennäköisesti tarvitaan kuitenkin boost-hakkuri, jolla lämpösähkögeneraattorin jännite voidaan nostaa akkujännitteen tasolle. Lämpösähkögeneraattori on herkkä lämpötilavaihteluille, minkä seurauksena lähtöjännite vaihtelee (Muralidhar et al. 2018). Tästä syystä generaattorin kuormitusta tulee säätää aktiivisesti, jotta se pysyy optimaalisena joka tilanteessa.

Yksi vaihtoehto on käyttää buck-boost -hakkuria jännitteen säätöön. Buck-boost hakkurilla generaattorin lähtöjännitettä voidaan aktiivisesti säätää ja tarvittaessa kasvattaa (boost) tai laskea (buck) tilanteen mukaan (Muralidhar et al. 2018). Hakkurin lisäksi tarvitaan varsinainen latauksensäädin, joka ohjaa konvertterin ja akun lataamista. Hakkurina voidaan yhtä hyvin käyttää myös muita hakkurityyppejä tilanteen mukaan. Jos esimerkiksi lämpösähkögeneraattorin jännite pysyy varmasti alle akun jännitteen, niin silloin voidaan käyttää boost-hakkuria, jolla lähtöjännitettä voidaan kasvattaa. Kuvassa 13 on havainnollistettu lämpösähkögeneraattorin kytkeminen akkuun hakkurin välityksellä.



Kuva 13

Esimerkki lämpösähkögeneraattorin kytkemisestä akkuun. Lämpösähkögeneraattori on kytketty hakkurin (DC/DC) välityksellä akkuun. Hakkuri sisältää tehoelektronikan, joka muuntaa lämpösähkögeneraattorin jännitteen akun jännitettä korkeampaan potentiaaliin, sekä ohjaimen, joka ohjaa tehoelektronikan toimintaa. Kuva on uudelleenluotu (Muralidhar et al. 2018) lähteestä.

4.5 Kustannukset

Lämpösähkögeneraattorin termosähköiset moduulit on yksittäinen suuri kuluerä. Moduulit maksavat koosta, tehosta ja tyypistä riippuen noin 10 – 100 €. Lämpösähkögeneraattorin hinta nousee helposti satoihin euroihin jo pelkästään moduulien arvosta. Aiemmin lasketun esimerkin tapauksessa Hi-Z 9 termosähköiset moduulit maksavat 15 \$ (n. 14 € 24.3.2020) kappale, eli generaattorin 175 moduulia maksavat yhteensä 2625 \$ (n. 2400 € 24.3.2020). Muita kustannuksia ovat generaattorin suunnitteluun ja rakentamiseen käytettävän työajan kustannukset (palkat), lämmönvaihtimen-, jäähdyttimen-, kiinnikkeiden- ym. materiaalien kustannukset sekä akun lataussäädin. Esimerkkinä erään prototyypin kokonaiskustannusarvio ilman akun lataussäädintä oli 1648 £ (n. 1800 € 24.3.2020) (Liu C. et al. 2016). Todellisuudessa lämpösähkögeneraattorin kustannukset olisivat todennäköisesti huomattavasti alhaisemmat, jos lämpösähkögeneraattoreita valmistettaisiin suurina volyymeina sarjatuotantona. Termosähköisten materiaalien käyttö ei kuitenkaan ole vielä yleistynyt esimerkiksi ajoneuvoissa siinä määrin, että niiden käyttäminen kaupallisessa mielessä olisi taloudellisesti kannattavaa.

5. YHTEENVETO

Lämpösähkögeneraattorin suunnittelussa tulee ottaa huomioon monta eri tekijää. Lämpösähkögeneraattori itsessään on varsin yksinkertainen ja siten myös kestävä laite, mutta laitteen tehokas toiminta vaatii huolellista suunnittelua ja perehtymistä. Lämpösähkögeneraattorit ovat herkkiä lämpötilavaihteluille, minkä takia lämpösähkögeneraattorit ovat ennen kaikkea sovellus- ja käyttökohtaisia laitteita. Esimerkiksi auton pakoputkiston lämpösähkögeneraattoreiden tapauksessa pakokaasun lämpötilavaihtelut vaikuttavat merkittävästi generaattorin tehoon ja hyötysuhteeseen, eikä yhdelle tietylle automallille valmistettu generaattori välttämättä toimisi vastaavalla tavalla toisessa automallissa.

Työn hybridisähköauton tapauksessa lämpösähkögeneraattori vaatii merkittävää jatkokehitystä. Tässä työssä käsiteltiin hyvin kapeasti auton lämpösähkögeneraattorin suunnittelua ja toteutusta johtuen osittain siitä, että hybridijärjestelmä on vielä kehitysvaiheessa, eikä sen toiminnasta tai rakenteesta ole tarkkaa tietoa. Tämän työn tavoitteena on kuitenkin osoittaa, että lämpösähkögeneraattorin käyttäminen työn hybridisähköautossa on mahdollista. Aiheesta on paljon aikaisempaa tutkimustietoa, johon tässä työssä on viitattu, ja jota lämpösähkögeneraattorin jatkokehityksessä on suotavaa käyttää. Generaattorin lopullinen rakenne, toteutustapa, teho ja hyötysuhde jäävät jatkokehityksen päätettäväksi. Lämpösähkögeneraattorin jatkokehityksen kannalta voidaan pohtia seuraavia kysymyksiä:

- Kuinka kaasuturbiinigeneraattoria käytetään ja kuinka pakokaasun lämpötila vaihtelee käytön aikana?
- Kuinka kaasuturbiinigeneraattori asennetaan autoon ja millainen tila on käytettävissä lämpösähkögeneraattorille?
- Voiko ajoviimaa hyödyntää tehokkaasti lämpösähkögeneraattorin jäähdyttämisessä?

Lämpösähkögeneraattorin osajärjestelmien (lämmönvaihdin, jäähdytin, latauksensäädin) kehitys kannattanee hajauttaa usealle työryhmälle. Kehityksen seuraavassa vaiheessa voitaisiin keskittyä ennen kaikkea lämmönvaihtimen ja jäähdytyksen toteutukseen. Tätä varten tulisi tietää tarkemmin esimerkiksi hybridijärjestelmän toimintatapa, parametrit ja rakenne, jotta lämpösähkögeneraattori voidaan optimoida materiaalien, tehokkuuden ja hyötysuhteen kannalta. Lämpösähkögeneraattorin kehitys vaatii yhteistyötä muiden hybridisähköauton järjestelmien kehittäjien kanssa.

LÄHTEET

BC-Robotics. 2020. Peltier Thermoelectric Generator Module. [viitattu 18.3.2020]. Saatavissa <https://www.bc-robotics.com/shop/peltier-thermoelectric-generator/>

Brito F.P., Pacheco N., Vieira R., Martins J., Martins L., Teixeira J., Goncalves L.M., Oliveira J., Hall M.J. 2020. Efficiency improvement of vehicles using temperature controlled exhaust thermoelectric generators. Teoksessa: Energy Conversion and Management. Vol. 203.

Crane D., Lagrandeur J. 2009. Progress Report on BSST-Led US Department of Energy Automotive Waste Heat Recovery Program.

Crane D., Lagrandeur J., Jovovic V., Ranalli M., Adlinger M., Poliquin E., Dean J., Kossakovski D., Mazar B., Maranville C. 2012. TEG On-Vehicle Performance and Model Validation and What it Means for Further TEG Development.

Emilsson E., Dahllöf L. 2019. Lithium-Ion Vehicle Battery Production. [viitattu 18.3.2020]. Saatavissa <https://www.ivl.se/download/18.14d7b12e16e3c5c36271070/1574923989017/C444.pdf>

Fernández-Yañez P., Armas O., Capetillo A., Martínez-Martínez S. 2018. Thermal analysis of a thermoelectric generator for light-duty diesel engines. Teoksessa: Applied Energy. Vol. 226. S. 690-702.

Gasum. 2020. Biokaasu osana kiertotaloutta. [viitattu 18.3.2020]. Saatavissa <https://www.gasum.com/kaasusta/biokaasu/biokaasu/>

Han M., Jin Y., Lee D., Kim S. 2017. Thermoelectric Properties of Bi₂Te₃: CuI and the Effect of Its Doping with Pb Atoms. [viitattu 3.4.2020]. Saatavissa <https://www.mdpi.com/1996-1944/10/11/1235/pdf>

Hi-Z Technology. 2020. 9 watt module Data Sheet. [viitattu 18.3.2020]. Saatavissa <https://hi-z.com/wp-content/uploads/2019/03/DataSheets/Data%20Sheet%20HZ-9.pdf>

ICCT. 2018. Effects of Battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions. [viitattu 18.3.2020]. Saatavissa https://theicct.org/sites/default/files/publications/EV-life-cycle-GHG_ICCT-Briefing_09022018_vF.pdf

Jaziri N., Boughamoura A., Müller J., Mezghani B., Tounsi F., Ismail M. 2019. A comprehensive review of Thermoelectric Generators: Technologies and common applications. Teoksessa: Energy Reports.

Kim T., Negash A., Cho G. 2016. Waste heat recovery of a diesel engine using a thermoelectric generator equipped with customized thermoelectric modules. Teoksessa: Energy Conversion and Management. Vol. 124. S. 280-286.

Kim T., Kwak J., Kim B. 2018. Energy harvesting performance of hexagonal shaped thermoelectric generator for passenger vehicle applications: An experimental approach. Teoksessa: Energy Conversion and Management. Vol. 160. S. 14-21.

Kumar S., Heister S., Xu X., Salvador J., Meisner G. 2013 Thermoelectric Generators for automotive Waste Heat Recovery Systems Part II: Parametric Evaluation and Topological Studies

Lan S., Yang Z., Chen R., Stobart R. 2018. A dynamic model for thermoelectric generator applied to vehicle waste heat recovery. Teoksessa: Applied Energy. Vol. 210. S. 327-338.

Lasance C. 2016. The Seebeck Coefficient. [viitattu 28.3.2020]. Saatavissa <http://www.electronics-cooling.com/2006/11/the-seebeck-coefficient/>

Lee H. 2017. Thermoelectric properties. Teoksessa: Thermoelectrics: Design and materials. S. 391-398. [viitattu 28.3.2020]. Saatavissa <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9781118848944.app5>

Liu C., Pan X., Zheng X., Yan Y., Li W. 2015. An experimental study of a novel prototype for two-stage thermoelectric generator from vehicle exhaust. Teoksessa: Journal of the Energy Institute. Vol. 89. S. 271-281.

Liu X., Deng Y.D., Li Z., Su C.Q. 2015. Performance analysis of a waste heat recovery thermoelectric generation system for automotive application. Teoksessa: Energy Conversion and Management. Vol. 90. S. 121-127.

Massaguer A., Massaguer E., Comamala M., Pujol T., Montoro L., Cardenas M.D., Carbonell D., Bueno A.J. 2017. Transient behavior under a normalized driving cycle of an automotive thermoelectric generator. Teoksessa: Applied Energy. Vol. 206. S. 1282-1296.

Massaguer A., Massaguer E., Comamala M., Pujol T., González J.R., Cardenas M.D., Carbonell D., Bueno A.J. 2018. A method to assess the fuel economy of automotive thermoelectric generators. Teoksessa: Applied Energy. Vol. 222. S. 42-58.

Motiva. 2020. Sähköautot. [viitattu 18.3.2020]. Saatavissa: <https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava-liikenne-ja-liikkuminen/nain-liikut-viisaasti/valitse-auto-viisaasti/ajoneuvo-tekniikka/moottoritekniikka/sahkoautot>

Muralidhar N., Himabindu M., Ravikrishna R.V. 2018. Modeling of a hybrid electric heavy duty vehicle to assess energy recovery using thermoelectric generator. Teoksessa: Energy. Vol. 148. S. 1046-1059.

Orr B., Akbarzadeh A., Lappas P. 2017. An exhaust heat recovery system utilising thermoelectric generators and heat pipes. Teoksessa: Applied Thermal engineering. Vol. 126. S. 1185-1190.

Shen Z., Tian L., Liu X. 2019. Automotive exhaust thermoelectric generators: Current status, challenges and future prospects. Teoksessa: Energy Conversion and Management. Vol. 195. S. 1138-1173.

Stobart R., Wijewardane M.A., Yang Z. 2017. Comprehensive analysis of thermoelectric generation systems for automotive applications. Teoksessa: Applied Thermal Engineering. Vol. 112. S. 1433-1444.

Thermoelectrics. 2020. Thermoelectric Properties of Materials. [viitattu 18.3.2020]. Saatavissa <http://thermoelectrics.matsci.northwestern.edu/thermoelectrics/index.html>

Tilastokeskus. 2017. Liikenteen energiakulutus. [viitattu 18.3.2020]. Saatavissa https://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/energia2018/html/suom0004.htm

Zhang Y., Cleary M., Wang X., Kempf N., Schoensee L., Yang J., Joshi G., Meda L. 2015. High-temperature and high-power-density nanostructured thermoelectric generator for automotive waste heat recovery. Teoksessa: Energy Conversion and Management. Vol. 105. S. 946-9

LIITTEET

Liite 1. Aikaisempia tutkimuksia liittyen auton lämpösähkögeneraattoreihin.

Lähde	\hat{P}_{TEG} [W]	Järjestelmän kuvaus
(Crane et al. 2009)	125	Litteä lämmönvaihdin. Moduulit yhdessä tasossa. Vesijäähdytys.
(Crane et al. 2012)	712	Sylinterin muotoinen lämmönvaihdin. Moduulit sylinterin ulkopinnalla. Jäähdytys moottorin jäähdytinnesteellä.
(Kumar et al. 2013)	552	Sylinterin muotoinen lämmönvaihdin. Moduulit sylinterin ulkopinnalla. Jäähdytys moottorin jäähdytinnesteellä.
(Liu X. et al. 2015)	944	Neljä rinnakkaista litteää lämmönvaihdinta. Moduulit kahdella pinnalla. Vesijäähdytys.
(Zhang et al. 2015)	1002	Integroitu lämmönvaihdin. Moduulit useassa tasossa. Vesijäähdytys.
(Kim et al. 2016)	119	Litteä lämmönvaihdin. Moduulit kahdella pinnalla. Vesijäähdytys.
(Massaguer et al. 2017)	29	Litteä lämmönvaihdin. Moduulit kahdella pinnalla. Vesijäähdytys.
(Orr et al. 2017)	38	Lämpöputket lämmönvaihtimessa ja jäähdyttimessä. Jäähdytys alumiinisiileillä ja puhaltimilla.
(Stobart et al. 2017)	68	Suorakaiteen muotoinen lämmönvaihdin. Moduulit lämmönvaihtimen neljällä pinnalla. Vesijäähdytys.
(Fernández-Yañez et al. 2018)	270	Litteä lämmönvaihdin. Moduulit kahdella pinnalla. Jäähdytys moottorin jäähdytinnesteellä.
(Kim et al. 2018)	98.8	Kuusikulmion mallinen lämmönvaihdin. Moduulit lämmönvaihtimen kuudella pinnalla. Jäähdytys moottorin jäähdytinnesteellä.
(Lan et al. 2018)	800	Litteä lämmönvaihdin. Moduulit kahdella pinnalla. Jäähdytys moottorin jäähdytinnesteellä.
(Massaguer et al. 2018)	38.5	Litteä lämmönvaihdin. Moduulit kahdella pinnalla. Vesijäähdytys.
(Muralidhar et al. 2018)	1926	Simulaatio. Litteä lämmönvaihdin. Moduulit kahdessa tasossa.
(Nour Eddine et al. 2018)	5.4	Litteä lämmönvaihdin. Moduulit kahdella pinnalla. Vesijäähdytys.
(Yang et al. 2018)	20.6	Simulaatio. Integroitu rakenne. Jäähdytys moottorin jäähdytinnesteellä.
(Brito et al. 2020)	1038	Erillinen lämmönvaihdin pakokanavassa ja termosähköisillä moduuleilla. Lämmönvaihto johtuvuussäätävillä lämpöputkilla. Vesijäähdytys.