

**THERMAL ENERGY HARVESTING BY MEANS OF  
THERMOELECTRICS FOR AN EXHAUST GAS  
CLEANING SYSTEM ON BOARD OF A VESSEL**

**JÄÄKSOOJUSE KASUTAMINE LAEVAL SUITSUGAASIDE  
PESURILE INTEGREERITUD TERMOELEKTRILISE  
SEADMEGA**

MASTER THESIS

Autor/Author: Karl Mustjõgi

Tallinn 2020

# SUMMARY

The waste heat and CO<sub>2</sub> in quantity have been rising for the last decades with more contributing factor over time being the maritime industry [1]–[3]. Thus, the possibility of using some of the waste heat to convert directly into electrical energy was investigated.

In this thesis the overview of the thermoelectric materials and thermoelectric generators (TEGs) along with applications was given. Many of the thermoelectric materials studied and improved to this day have already been discovered decades ago. Most improvement has been noticed by doping the materials with substituting some of the atoms to enhance the electrical conductivity and decrease the thermal conductivity. Thermoelectric generators have been used initially on spacecrafts but as the materials and technology developed, more fields of applications have found use in TEGs. This includes using TEG in extreme environments, waste heat recovery, decentralized domestic power applications, micro-generation for microelectronics and solar thermoelectric generators.

With the current exhaust gas cleaning systems on vessels, the concentration of gaseous pollutants and particulate matter are removed or reduced to satisfactory level in comparison to the set limits [26]. Along with other exhaust gas cleaning systems (dry scrubbers, selective catalytic reduction, and exhaust gas recirculation) wet scrubber was investigated in this study, which is targeted to lower the SO<sub>x</sub> and particulate matter concentration in exhaust gas.

The first zone at which the scrubbing process begins, is the rapid cooling of exhaust gas called quenching. The quenching reduces the heat of exhaust gas vastly in preparation for the scrubbing zone. This part of the scrubber was analysed to be replaced by the TEG system as the manufacturing cost of the quenching segment is expensive relative to its mass compared to the rest of the scrubber. The TEG system in this case uses heat exchanger to transfer heat from a source to the TEG unit. The geometrical parameters of heat exchanger were calculated to lower the exhaust gas temperature to desired temperature. After initial calculations and further optimisations, the conclusion was made that the heat exchanger could replace the quenching segment entirely. The results of the calculations are shown in Table 8.1.

Table 8.1 Exhaust gas inlet temperatures, desired outlet temperatures and corresponding outlet temperatures from heat exchanger

<b>Parameters</b>	<b>Minimum condition</b>	<b>Average condition</b>	<b>Maximum condition</b>
Exhaust gas inlet temperature, $T'_{1,}$ K	488,15	565,65	643,15
Desired outlet temperature, $T''_{1,}$ K	393,15	393,15	393,15
Achieved outlet temperature, $T''_{1,}$ K	401,6	389,2	387,5

Given the possibility of integrating the TEG system to scrubber, the financial calculations were done and can be seen in Table 8.2.

Table 8.2 Financial indicators for investing in the integration of TEG system to scrubber

<b>Financial indicator</b>	<b>Value</b>
Financial return period, $FRP,$ years	3,7
Investment period, $I_0,$ years	10
$IRR,$ %	23 %

Although the investment period is set to 10 years, TEG systems can operate up to couple of decades [6].

The realisation of replacing quenching segment with TEG system needs further and in-depth calculations on fouling and possible corrosion over time, although the selected material is of acid proof stainless steel. Although from the perspective of heat exchange, the replacement is possible, further investigation should be considered regarding the nature of cooling the exhaust gas. This is due to the difference in adiabatic cooling that is occurring currently compared to extracting heat with heat exchanger. Furthermore, more accurate results regarding annual savings and other financial indicators could be done by analysing the occurring pressure drops in depth.

# KOKKUVÕTE

Jääksoojuse ja CO<sub>2</sub> kogused on viimaste aastakümnete jooksul pidevalt tõusnud. Seejuures on üha suurema osakaalu moodustamas merendus [1]–[3]. Seetõttu on töös uuritud jääksoojuse kasutamist laeval selliselt, et väljund oleks otsene elektrienergia.

Töös on antud ülevaade termoelektrilistest materjalidest ja termoelektrilistest generaatoritest (TEG) koos nende kasutusalaadega. Paljud tänaseni uuritavad materjalid olid juba avastatud mitmeid kümnendeid tagasi. Termoelektrilistele materjalidele molekulides erinevate omadustega aatomite välja vahetamine on andnud seejuures suurima efekti, tõstes elektrijuhtivust ja langetades soojusjuhtivust. Algselt leidsid TEG-id kasutust peamiselt kosmoselaevadel, kuid materjalide ja tehnoloogia täiustumisel on TEG leidnud kasutust erinevates sektorites. Praeguse seisuga kasutatakse TEG-e nii ekstreemsetes keskkondades, jääksoojuse kasutamiseks, väheasustatud piirkondades, mikro-generaatorites mikroelektronika tarbeks, kui ka päikese soojuse genereerimisel elektrienergiaks.

Praeguste suitsugaaside puhastussüsteemidega suudetakse tagada heitgaasides sisalduvate saasteainete vähendamine või elimineerimine piisaval tasemel vastavalt seatud normidele [26]. Töös kirjeldatud suitsugaaside puhastussüsteemidest (kuiv suitsugaaside pesur, katalüütiline redutseerimine ja suitsugaaside retsirkuleerimine) on märg suitsugaaside pesurit uuritud, mis eraldab suitsugaasist vääveloksiide ja tahkeid osakesi.

Uuritud suitsugaaside pesuri esimene osa on suitsugaaside kiireloomuline jahutamine. Selles protsessis eraldatakse suur osa suitsugaaside soojusest tagamaks piisavalt madala temperatuuri, et järgmises etapis eraldada vääveloksiidid ja tahked osakesed. Uurimistöö seisnes skraberite esimest protsessi hõlmava osa väljavahetamise võimaluse uurimises TEG süsteemi vastu. Selle tingis asjaolu, et skraberite kiirjahutusprotsessis kasutatavad materjalid ja valmistus on võrreldes selle massi ja ülejäänud skraberiga kallis. Antud juhul oli TEG-i sisendtemperatuuri saavutamiseks suitsugaaside voolu paigaldatud soojusvaheti. Töös on arvatud suitsugaaside soojusvahetist lahkumise temperatuurid vastavalt soojusvaheti geomeetria, mida võrreldi vajalike suitsugaaside temperatuuridega säilitamiseks skraberite efektiivsuse. Esialgsete tulemuste põhjal soojusvahetit optimeeriti, et tagada piisav soojusülekanne suitsugaasidelt veele. Töö tulemuseks on järeldus, et skraberite esimest protsessi on võimalik asendada soojusvahetiga, mis läbi soojuskandja (vee) on sisendiks TEG-ile genereerimaks elektrienergiat. Lõplikud tulemused arvutustest on toodud allolevas tabelis (Tabel 8.1).

Tabel 8.1 Soojusvahetist väljuvate suitsugaaside temperatuurid vastavalt suitsugaaside sisenemistemperatuuridele ja vajalikele väljumistemperatuuridele

<b>Parameeter</b>	<b>Miinum koormus</b>	<b>Keskmine koormus</b>	<b>Maksimum koormus</b>
Suitsugaasi sisenemistemperatuur, $T'_1$ , K	488,15	565,65	643,15
Vajalik väljumistemperatuur, $T''_1$ , K	393,15	393,15	393,15
Arvutatud suitsugaaside väljumistemperatuurid soojusvahetist, $T''_1$ , K	401,6	389,2	387,5

Tulenevalt võimalusest välja vahetada kogu kiirjahutusega seotud osa skraberist, arvutati majanduslikud näitajad, mis on toodud allolevas tabelis (Tabel 8.2).

Tabel 8.2 Majanduslikud näitajad investeerides TEG süsteemi integreerimisse

<b>Majanduslik näitaja</b>	<b>Väärtus</b>
Lihttasuvusaeg, $FRP$ , a	3,7
Investeeringuperiood, $I_0$ , a	10
Kapitalitootlikkus, $IRR$ , %	23 %

Kuigi investeeringuperioodiks on valitud 10 aastat, siis tegelikkuses kestavad TEG süsteemid kuni 30 aastat, mis omakorda tõstab investeeringu tootlikkust.

Realiseerimaks skraberkiirjahutusprotsessi väljavahetamist TEG süsteemi vastu, tuleks põhjalikumalt uurida pikaajalisemat mõju ummistuste ja korrosiooni vastu soojusvahetis, olenemata asjaolust, et materjaliks oli valitud happekindel roostevaba teras. Kuigi soojusülekanne vaatenurgast on jahutussüsteemi vahetamine TEG süsteemi vastu võimalik, tuleks uurida jahutamise olemuste erinevust. Erinevus seisneb selles, et kiirjahutamine praeguses süsteemis toimub adiabaatilisel, kuid uuritud soojusülekanne soojusvahetile mitte. Lisaks on võimalik täpsemalt arvutada majanduslikud näitajad analüüsides põhjalikumalt rõhulangu mõju.