



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

## APLIKACE TERMoeLEKTRICKÝCH GENERÁTORŮ

APPLICATIONS OF THERMOELECTRIC GENERATORS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Samuel Kováč

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Vítězslav Máša, Ph.D.

BRNO 2021

# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	<b>Samuel Kováč</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Energetika, procesy a životní prostředí
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. Vítězslav Máša, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## **Aplikace termoelektrických generátorů**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Termoelektrické generátory jsou pozoruhodnou technologií pro přímý převod tepelné energie na elektrickou. Jejich použití je závislé na rozsahu pracovních teplot, v němž má daný termoelektrický generátor pracovat. První úspěšné aplikace dokazují, že tato technologie nachází své místo v průmyslové praxi. Termoelektrické generátory mohou zajistit dodávku elektrické energie v hůře dostupných místech nebo obecně zvýšit energetickou účinnost systému.

### **Cíle bakalářské práce:**

1. Představení principu termoelektrické přeměny tepla na elektrickou energii,
2. Popis faktorů ovlivňujících proces termoelektrické přeměny,
3. Sestavení přehledu případových studií a jejich parametrů,
4. Návrh integrace termoelektrického generátoru ve zkušebně NETME Centre.

### **Seznam doporučené literatury:**

JAZIRI, Nesrine, Ayda BOUGHAMOURA, Jens MÜLLER, Brahim MEZGHANI, Fares TOUNSI a Mohammed ISMAIL. A comprehensive review of Thermoelectric Generators: Technologies and common applications. Energy Reports [online]. 2019. DOI: 10.1016/j.egy.2019.12.011. ISSN 23524847.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty



## Abstrakt

Práce popisuje princip termoelektrické přeměny a jevy, vďaka ktorým je sprostredkovaná, ďalej sa zaoberá faktormi, na ktoré treba hľadieť pri snahe o dosiahnutie najlepšej účinnosti termoelektrickéj premeny. Ďalšia časť zahrňuje prehľad prípadových štúdií, ktoré poslúžia ako inšpirácia pre poslednú, hlavnú časť tejto práce, ktorá sa bude zaoberať návrhom integrácie termoelektrického generátoru (TEG).

V tejto práci nájdeme postup výberu jednotlivých komponentov, ktoré sú nevyhnutné pre správnu funkčnosť termoelektrického generátoru. Testovanie TEG je prevedené na základe matematického modelu, ktorý by mal potvrdiť alebo vyvrátiť uskutočniteľnosť tohto projektu.

Výsledkom je elektrický obvod zahrňujúci termoelektrický generátor, jednosmerný menič a senzory bezdrôtovej siete. Matematický model potvrdil, že TEG by bol schopný napájať senzory tlaku, vlhkosti a teploty, pričom by produkoval prúd o hodnote 0,314 A. Predpokladaný teplotný rozdiel je 70 °C. Práca by mala oboznámiť čitateľa s hlavnými úskaliaми termoelektrickéj premeny. Taktiež by mohla slúžiť, ako opora pri riešení podobného problému implementácie TEG v konkrétnej aplikácii.

## Klíčovú slová

Termoelektrický generátor , mikroturbína , termoelektrická premena , jednosmerný menič

## Abstract

The work describes the principle of thermoelectric conversion and the phenomenons by which it is mediated, it also deals with the factors that need to be sought in an effort to achieve the best efficiency of thermoelectric conversion. The next part includes an overview of case studies that serve as inspiration for the last, main part of this work, which will deal with the design of thermoelectric generator (TEG) integration.

In this work found the procedure of selection of individual components that are not be excluded for the proper functioning of the thermoelectric generator. While the testing is performed on the basis of a mathematical model. It should confirm or refute the implementation of this project.

Today, there is an electrical circuit including a thermoelectric generator, a DC converter, and wireless network sensors. The mathematical model confirmed that the TEG would be able to power -pressure, humidity and temperature sensors, at current of 0.314 A. The assumed temperature difference is 70 °C. The work should acquaint the reader with the main pitfalls of thermoelectric conversion. It could also serve as a support in solving a similar problem of TEG implementation in a particular application.

## Key words

Thermoelectric generator, microturbine, thermoelectric conversion, DC /DCconverter

### **Bibliografická citácia**

KOVÁČ, Samuel. *Aplikace termoelektrických generátorů* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132798>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Vítězslav Máša.

## **Čestné Prehlásenie**

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému „Aplikace termoelektrických generátorů“ vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry uvedenej v časti „Zdroje“.

## **PodĎakovanie**

Touto cestou by som chcel poĎakovať doc. Ing. Vítězslavovi Mášovi PhD. za vedenie pri bakalárskej práci a pohodovú atmosféru na konzultáciách.



# Obsah

Úvod .....	8
1.Princíp termoelektrickej premeny .....	9
1.1 Seebeckov efekt .....	9
1.2 Peltierov efekt .....	10
1.3 Thomsnov efekt.....	11
1.4 Kelvinove vzťahy.....	11
1.5 Zhrnutie TE javov.....	12
1.6 TEG konštrukcia.....	12
1.7 Typy TE modulov .....	13
2.Faktory ovplyvňujúce proces termoelektrickej premeny .....	14
2.1 Koeficienty vyjadrujúce vlastnosti použitých materiálov.....	14
2.1.1 Prehľad a porovnanie dostupných materiálov a ich koeficienty.....	15
2.2 Hladina napätia .....	16
2.3 Teplotný rozdiel.....	17
2.4 Výkon termoelektrického modulu .....	17
2.4.1 Maximálny výkon .....	17
2.5 Tepelné toky studenej a teplej strany.....	18
2.6 Joulovo teplo .....	18
2.7 Teplovodivá pasta .....	19
2.8 Zhrnutie .....	19
3. Prehľad prípadových štúdií a ich parametrov .....	20
3.1 Využitie odpadového tepla vo východo-japonských oceliarniach .....	20
3.2 Flexibilný termoelektrický generátor pre napájanie uzlu WSN siete.....	21
3.3 Termoelektrický generátor pre nukleárnu elektrárň .....	22
3.4 Flexibilný TEG v izolácii teplovodnej trubky.....	23
3.5 Zhrnutie poznatkov s prípadových štúdií .....	24
4. Návrh integrace termoelektrického generátoru ve zkušebně NETME Centre.....	24
4.1 Zdroj tepla pre TEG.....	25
4.2 Voľba termoelektrického modulu .....	26
4.3 Medzikus .....	27
4.4 Snímač okolitých podmienok .....	27
4.5 DC/DC Menič .....	28
4.6 Chladič.....	29
4.7 Tepelná sústava.....	30
4.7.1 Ohmov zákon.....	30

---

4.7.2 Kirchoffove zákony .....	30
4.8 Matematický model .....	31
4.7 Postup výpočtu.....	32
4.7.1 Elektrická rovnice .....	33
4.8 Výpočet a vstupné parametre .....	33
5.Záver.....	34
Zdroje .....	35
Prehľad použitých veličín .....	37

## Úvod

Dopyt po energii má trvale rostúci trend. So zvyšujúcou sa populáciou a jej rastúcimi nárokmi na životnú úroveň sa nepredpokladá, že by sa tento trend mal zmeniť. S týmto prichádza čo raz väčšia snaha o uhlíkovú neutrálnosť a využívanie zdrojov energie s menším dopadom na životné prostredie. Tieto snahy nás nútia zefektívniť proces získavania a využitia energie. To slúži ako motivácia tejto práce, ktorej hlavné časti zhrňujú technológiu termoelektrického generátora (TEG), čo je termoelektrický (TE) modul zapojený ako generátor. TEG dokáže tepelnú energiu premieňať priamo na elektrickú, a tak napomôcť plnšiemu využitiu energie, ktorá sa produkuje. Zatiaľ však konštatujeme, že TEG-y nepracujú s vysokou účinnosťou, a teda možnosť ich aplikácie je týmto poznačená. V súčasnosti prebieha snaha o vylepšenie účinnosti týchto zariadení [1]. Napriek tomu si TEG-y nachádzajú miesto v rôznych oblastiach ako aeronautika, medicína, priemysel [2].

Na začiatku práce sa budeme zaoberať princípom termoelektrickej premeny, aby čitateľ porozumel základným javom, ktoré sa v TEG odohrávajú. Budú predstavené hlavné komponenty, z ktorých sa termoelektrický modul skladá a aké typy poznáme. V druhej kapitole je diskutovaný problém faktorov ovplyvňujúcich takúto premenu. Táto kapitola by mala ukázať matematické vzťahy, vďaka ktorým môžeme termoelektrickú (TE) premenu definovať a modelovať tak jej chovanie.

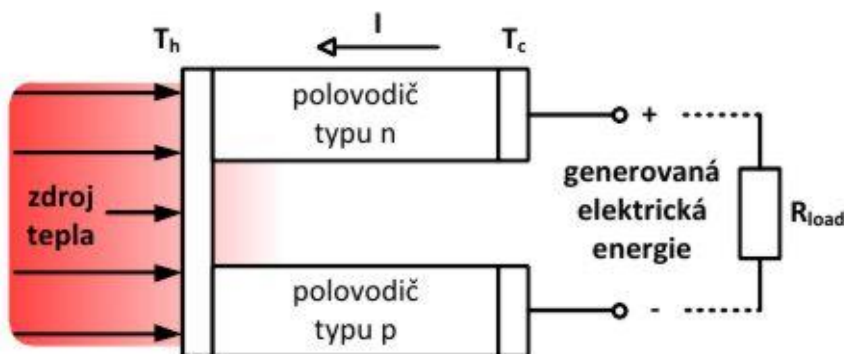
V kapitole číslo 3 je uvedený prehľad prípadových štúdií. Tieto nám slúžia ako inspirácia pri riešení problému integrácie TEG v 4. kapitole. Posledná kapitola ukazuje spôsob akým sme postupovali pri riešení problému a sumarizuje výsledky, ktoré sme dosiahli.

## 1.Princíp termoelektrickej premeny

Termoelektrická premena je sprostredkovaná tromi fyzikálnymi javmi (alebo tiež efektmi) tzv. termoelektrickými javmi objavenými v 19. storočí. A to Seebeckovým, Peltierovým a Thomsnovým javom, pričom ich vzťahy sú relatívne blízke. Objavené boli však tromi rôznymi ľuďmi, ktorých mena nesú v názve. Tieto tri javy sú spolu zviazané Kelvinovými vzťahmi, ktoré ich dávajú do vzájomných relácií jedného s druhým pre lepšiu uchopiteľnosť či merateľnosť.

### 1.1 Seebeckov efekt

Seebeckov efekt sa vzťahuje k deju, ktorý prebieha v mieste styku dvoch rôznych vodivých materiálov. Tieto vodiče sú na koncoch spojené taktiež vodivo. Toto spojenie nám predstavuje jednoduchú TE dvojicu. Uvažujeme, že vodiče budú na jednom konci chladené a na druhom konci zahrievané. Zákon popisuje prerozdelenie kladných a záporných častíc na základe teplotného gradientu, studený koniec bude kladne nabitý a teplý koniec bude obsahovať viac elektrónov, čiže bude záporne nabitý. To vedie k rozdielu elektrických potenciálov týchto dvoch koncov. Ak by sme mali dostatočne citlivý voltmeter, nameriame medzi koncami napätie, ktoré bude priamo úmerného rozdielu teplôt medzi koncami tejto TE dvojice.[19] V praxi môže byť táto premena pozorovaná v termoelektrických moduloch, kde TE dvojica pozostáva z polovodičov typu n a typu p. (Obr.1)



Obr.1 Seebeckov efekt v TE dvojici [4]

Tento jav je popísaný za pomoci Seebeckovho koeficientu  $\alpha_{AB}$ , ktorý je podielom vzniknutého napätia a rozdielu teplôt .

$$\alpha_{AB} = U / \Delta T \quad (1)$$

$\alpha_{AB}$  -Seebeckov koeficient spojenia materiálov A a B [V/K]

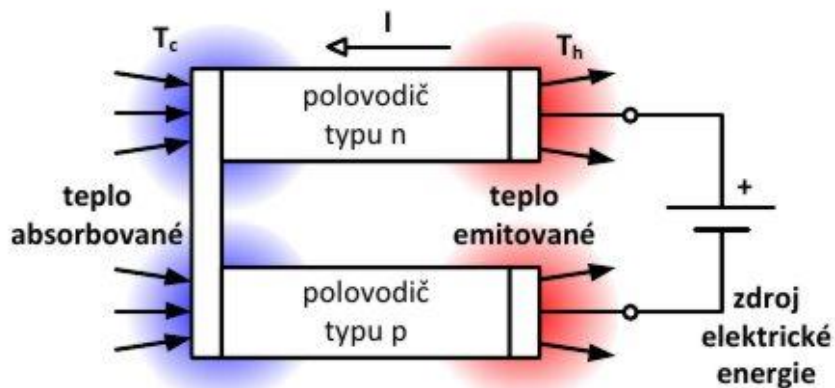
$U$  -napätie medzi koncami TE dvojice [V]

$\Delta T$ - rozdiel teplôt medzi koncami TE dvojice[K,°C]

Pričom  $\alpha_{AB}$  je rozdielom absolútnych Seebeckových koeficientov jednotlivých materiálov v našom prípade polovodičov vytvárajúcich TE dvojice [3].

## 1.2 Peltierov efekt

Peltierov efekt, objavený pár rokov po Seebeckovom efekte, ide akoby o obrátený jav k Seebeckovmu. Tiež sa vzťahuje na TE dvojicu. Tento krát podmienkou je prechod prúdu takýmto spojením vodičov, čo má za následok zahrievanie jedného konca a chladenie druhého. Pričom to závisí na smere prúdu, ktorý prechádza termočlánkom. Tohto javu sa využíva napríklad pri autochladničkách.



Obr.2 Peltierov efekt v TE dvojici [4]

Peltierov efekt je, ale ťažko pozorovateľný na jednej TE dvojici na koľko je vždy sprevádzaný vznikom Joulovho tepla, ktoré vzniká pri prechode prúdu vodičom[11].

Peltierov koeficient sa rovná vzniknutému teplu podelenému veľkosťou elektrického prúdu prechádzajúcim TE dvojicou. [3]

$$\Pi_{AB} = Q/I \quad (2)$$

$\Pi_{AB}$ - peltierov koeficient [V/K]

$Q$ -teplo vzniknuté [J]

$I$ - prúd pochádzajúci TE dvojicou [A]

### 1.3 Thomsnov efekt

Tento efekt sa na rozdiel od predchádzajúcich dvoch vzťahuje iba k jednému vodiču, ktorým prechádza prúd a je vystavený teplotnému gradientu. Ak prúd prechádzajúci vodičom bude postupovať v smere rastu teploty, drôt sa bude ochladzovať a ak ide v protismere, teda od zahrievaného koncu k chladnejšiemu, bude sa drôt naopak zahrievať. [3]

$$q = \tau * I * \Delta T \quad (3)$$

$q$  -tepelný tok [W]

$\tau$  -Thomsnov koeficient[V/K]

$I$ -prúd prechádzajúci vodičom[A]

### 1.4 Kelvinove vzťahy

Kelvinove vzťahy slúžia k premosteniu 3 vyššie popísaných javov. Prvý vzťah hovorí o relácií Seebeckovho a Peltierovho koeficientu spojenia materiálov a teploty tohoto spoja. Ako sme spomínali priame meranie Peltierovho koeficientu je náročnejšie ako Seebeckoho, a tak sa používa tento vzťah.

$$\Pi_{AB} = \alpha_{AB}T \quad (4)$$

Druhý Kelvinov vzťah je využívaní pri zisťovaní koeficientov nie spojenia, ale absolútnych hodnôt koeficientov  $\tau_A, \tau_B, \alpha_A, \alpha_B$ . Čo sú hodnoty pre jednotlivé materiály. Tieto sú používané na porovnanie materiálov pomocou koeficientu Z a ZT, ktoré budú vysvetlené v kapitole 2.

$$\tau_A - \tau_B = T \frac{d\alpha_{AB}}{dT} \quad (5)$$

$\Pi_{AB}$ -Peltierov koeficient spojenia materiálov A a B [V/K]

$\alpha_{AB}$ - Seebeckov koeficient spojenia materiálov A a B [V/K]

T- absolútna teplota [K]

$\tau_A$ -Thmosnov koeficient materiálu A [V/K]

$\tau_B$ - Thmosnov koeficient materiálu B [V/K]

Pri jednotlivých materiáloch je potrebné poznať Seebeckov koeficient tak aj Peltierov, aby sme vedeli povedať, či TE materiál bude lepšie využitý v TE module určenom na chladenie, alebo v module určenom na generovanie. Zistenie absolútneho Seebeckovo koeficientu je mnohonásobne ľahšie, ako zistenie Peltierovho, nakoľko nám meranie zatieňuje vznik Joulovho tepla. K tomu slúži vzťah (4).

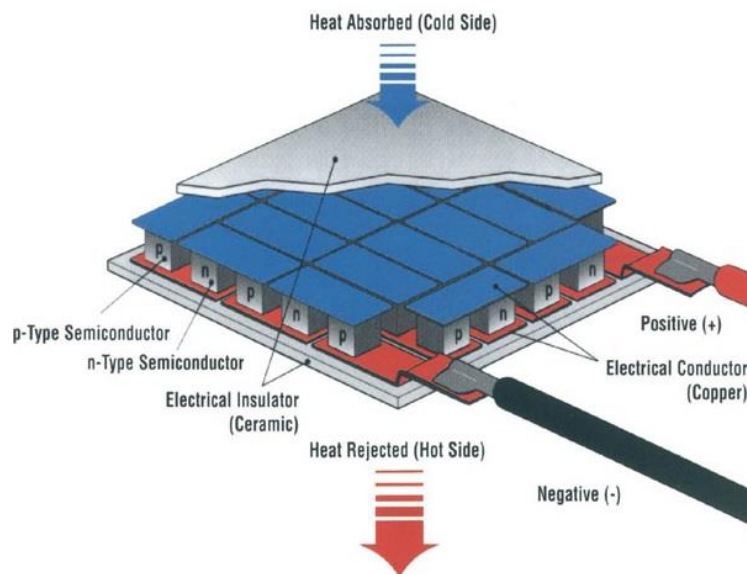
Druhý z týchto vzťahov sa využíva pri zisťovaní absolútneho Seebeckovho koeficientu, teda koeficientu jedného materiálu. [5]

## 1.5 Zhrnutie TE javov

Termoelektrická premena je sprostredkovaná Seebeckovým, Peltierovým, Thomsnovým efektom. Generovanie energie je založené na Seebeckovom efekte, chladienie a ohrev zase na Peltierovom. Ďalej nás bude zaujímať len Seebeckov efekt, nakoľko práca sa zaoberá problematikou generovania energie za pomoci TE premeny. Peltierov a Thomsnov efekt a Kelvinove vzťahy sú v práci uvedené za účelom plnšieho pochopenia termoelektrickej premeny.

## 1.6 TEG konštrukcia

Pred tým než sa posunieme k faktorom, ktoré TE premenu ovplyvňujú, je nutné predstaviť si termoelektrický modul, jeho hlavné časti a vlastnosti.

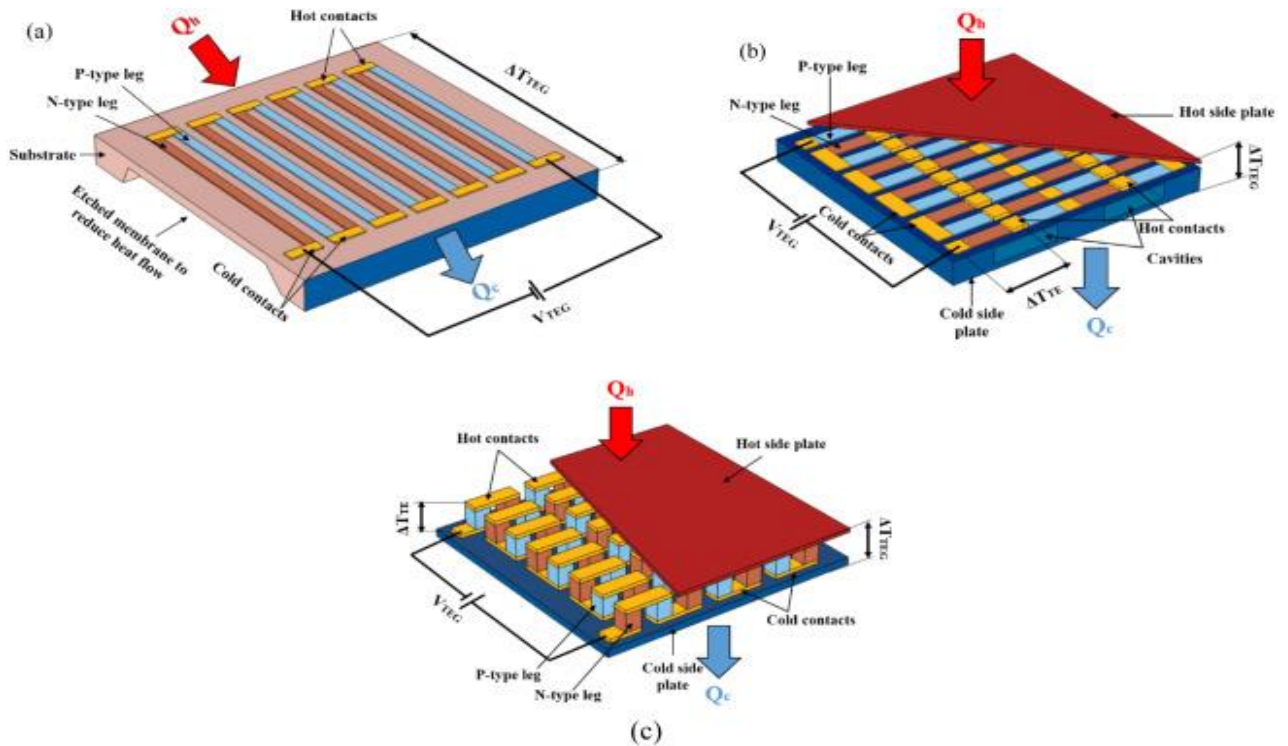


Obr.3 Schéma termoelektrického modulu TEG[20]

Jedna TE dvojica sama o sebe nedokáže premeniť veľké množstvo energie. Preto TE modul je zložený z TE dvojíc, ktoré sú sériovo zapojené, čím dostávame väčší výkon. Z pevnostných dôvodov sú vložené medzi dve matrice - keramické dosky. Rôzne možnosti TE modulov môžeme vidieť na obr.4

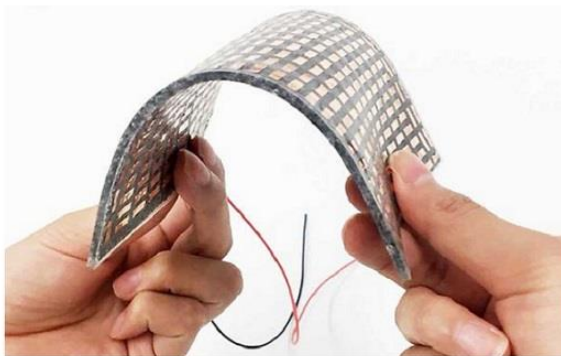
Takýto modul sa podľa materiálu, ktorý je v ňom použitý delí na TE modul určený na chladienie alebo na generovanie energie. Moduly sú väčšinou výrobcami označené ako TEC (thermo electric cooling) alebo TEG (generátor). TEG je zariadenie bez pohybujúcich sa častí, ktoré transformuje energiu z tepelnej formy na elektrickú.

## 1.7 Typy TE modulů



Obr.4 Rozdelenie „bulk“ (pevných) TE modulov [3]

Okrem týchto tradičných „bulk“ typov TE modulov existujú f-TEG (flexible TEG), ktoré sú tvorené termoelektrickými dvojicami inštalovanými na ohybnú maticu (Obr.5).



Obr.5 flexibilný TEG [20]



## 2. Faktory ovplyvňujúce proces termoelektrickej premeny

Z vyššie uvedených termoelektrických zákonov vyplýva, že hlavným faktorom ovplyvňujúcim proces TE premeny bude teplota resp. rozdiel teplôt medzi ktorými bude TEG fungovať. Ďalej účinnosť premeny je ovplyvnená výberom materiálu, ktorý bude použitý ako jadro TEG, čo zatiaľ predstavuje najväčšiu prekážku. Pre porovnanie TE materiálov boli zavedené koeficienty termoelektrickej premeny  $Z$  a  $ZT$ , ktoré hovoria o tom, ako sú dané materiály pre toto použitie vhodné. V neposlednom rade proces termoelektrickej premeny ovplyvňuje konštrukcia samotného TEG. TE modul na generovanie energie väčšinou nie je používaný osamote. V obvode býva prítomný aj jednosmerný menič a v závislosti na aplikácii nejaká forma chladenia. Nakoľko nie je možné transformovať jednosmerný prúd pomocou transformátora je používaný na tento účel jednosmerný menič alebo tiež nazývaný DC/DC menič. A zase úlohou chladiča je zachovať teplotný rozdiel a chrániť TE modul pred tepelným poškodením.

Taktiež v tejto kapitole je pojednávané o veličinách, ktoré sú dôležité pre zostrojenie matematického modelu v kapitole 3.

### 2.1 Koeficienty vyjadrujúce vlastnosti použitých materiálov

Termoelektrická premena je závislá od vlastností jednotlivých použitých TE materiálov. Je pre nás výhodné zaviesť veličinu, ktorá bude zohľadňovať všetky tieto vlastnosti. A tak bol zavedený bezrozmerný koeficient  $Z$ .

$$Z = \frac{\alpha^2}{R\lambda} \quad (6)$$

$\alpha$ -absolútny seebeckov koeficient [V/K]

R-elektrický odpor materiálu[ $\Omega$ ]

$\lambda$ -tepelná vodivosť materiálu[W/m<sup>2</sup>K]

Z-indikátor efektívnosti materiálu [-]

Neskôr sa zaviedol ešte jeden koeficient  $ZT$  kvôli tomu, že vlastnosti materiálov sa menia s teplotou. Každý materiál má nejaké teplotné optimum, pri ktorom dosahuje maximálny potenciál konvertovať energiu z tepelnej na elektrickú.

$$ZT = \frac{\alpha^2}{R\lambda} T \quad (7)$$

T - absolútna teplota materiálu [K]

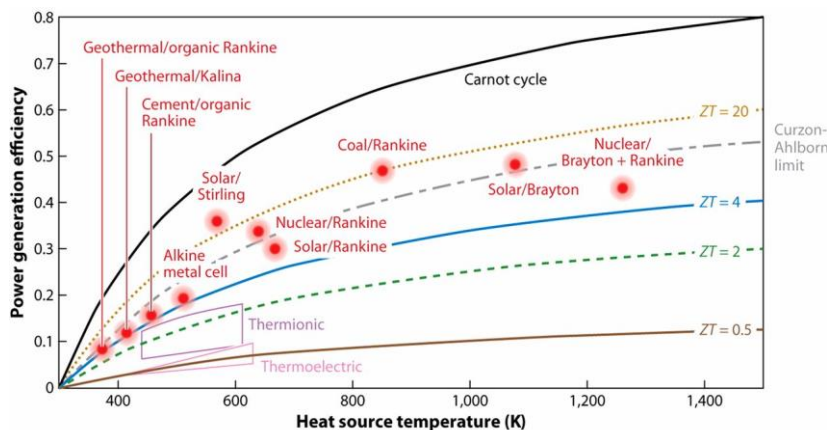
ZT- indikátor efektívnosti materiálu vztiahnutý k teplote [-]

Pre najúčinnějšíu termoelektrickú premenu potrebujeme, čo najvyššie koeficienty  $Z$  a  $ZT$ . Volený je teda materiál, ktorý disponuje vysokým Seebeckovým koeficientom, nízkou tepelnou vodivosťou a nízkym elektrickým odporom. Kovové materiály môžu mať nízky elektrický odpor, respektíve dobrú vodivosť, ale zato majú vysokú tepelnú vodivosť. Izolanty zas majú elektrický odpor príliš vysoký, čo nás privádza k polovodičom. Je to zároveň dôvod prečo polovodičové materiály dosahujú najvyššie hodnoty  $Z$  a  $ZT$ .

Všimnime si, že vo vzťahoch pre  $Z$  a  $ZT$  vystupuje Seebeckov koeficient a nie Peltierov. To znamená, že ak máme TE modul určený na chladenie nevyhnutne nemusí dosahovať rovnakých účinností ak ho zapojíme, ako generátor. Je to z dôvodu použitia iného materiálu v TE dvojiciach [17]. Pri nákupe TE modulov je, teda treba dať pozor, ako sa modul nazýva. Väčšinou moduly pre generovanie majú označenie TEG a moduly pre chladenie TEC.

### 2.1.1 Prehľad a porovnanie dostupných materiálov a ich koeficienty

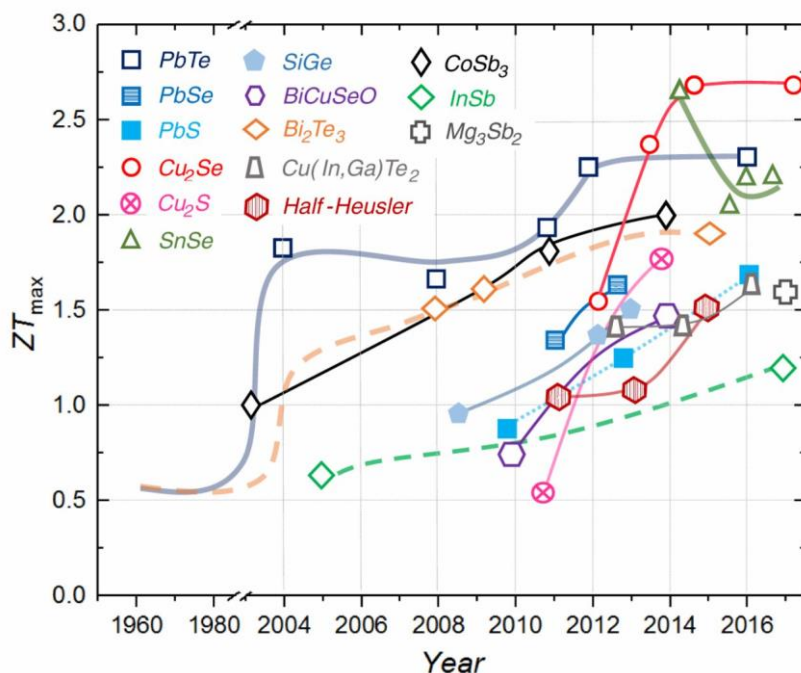
Posledných 60 rokov prebieha výskum v oblasti vylepšovania materiálov použiteľných na termoelektrickú premenu. Ako bolo spomínané v úvode práce, zatiaľ termoelektrická premena nedosahuje takej účinnosti premeny energie ako iné technológie, ktoré využívame na výrobu elektrickej energie. Na toto porovnanie slúži obr.6



Obr.6 závislosť účinnosti TEG od  $ZT$  [1]

Obrázok hovorí o tom, aké hodnoty  $ZT$  by materiály museli dosahovať, aby sa technológia TEG blížila účinnostiam teraz používaných technológií získavania elektrickej energie. Avšak aj pri malej účinnosti si nachádzajú svoje uplatnenie.

Ako všetky energiu premieňajúce procesy aj tento prechádza carnotizáciou. Čomu sa darí hlavne posledných 20 rokov. Bolo to umožnené vďaka technológiám 3D tlačiarň a injektáži materiálov. Taktiež je snahou nájsť také materiály s relatívne vysokými koeficientmi  $Z$  a  $ZT$ , ale pritom netoxického charakteru. Doterajšie snaženie výskumu materiálov je zhrnuté v Obr.7.



Obr.7 Výsledky výskumov materiálov použitých na TE premenu [1]

## 2.2 Hladina napätia

Nakoľko jedna termoelektrická dvojica neposkytuje dostatočné napätie či výkon v požadovanom rozsahu, spájajú sa tieto termočlánky do „termopile“(série TE dvojíc ), ktoré potom v spojení s väčšinou keramickými doskami tvoria TE modul TEG.

$$U_{out} = N \alpha_{AB} \Delta T \quad (8)$$

$U_{out}$ -napätie produkované TEG [V]

$N$  -počet TE dvojíc [-]

$\alpha_{AB}$ -Seebeckov koeficient spojenia materiálov AB [V/K]

$\Delta T$ -rozdiel teplôt medzi chladným a teplým koncom [K]

Kde  $N$  je počet TE dvojíc ,  $\alpha_{AB}$  je Seebeckov koeficient TE dvojíc a  $\Delta T$  je rozdiel teplôt medzi koncami termočlánku. Je vidieť, že so zvyšujúcim sa počtom termoelektrických dvojíc zapojených v sérii, dostávame väčšie napätie. Ale naproti tomu sa s vyšším  $N$  zvyšuje aj vnútorné elektrické napätie celého TEG. Takže pri procese výroby modulu je snaha o nájdenie tohto optima.

## 2.3 Teplotný rozdiel

Ako sme spomínali na to, aby v TEG prebiehala TE premena je potreba zariadenie vystaviť teplotnému gradientu. Aby sa dosahovalo, čo najväčších hodnôt napätia a výkonu je treba, čo najväčšieho teplotného rozdielu medzi koncami TE modulu. Za týmto účelom sa používajú rôzne variácie chladičov.

## 2.4 Výkon termoelektrického modulu

Elektrický výkon ,ktorý je schopný TEG generovať môžeme určiť zo vzťahu

$$P_{out} = \frac{U_{out}^2}{(R_i + R_e)^2} * R_e \quad (9)$$

$P_{out}$ -elektrický výkon produkovaný TEG [W]

$R_{in}$ -vnútorný elektrický odpor TEG[ $\Omega$ ]

$U_{out}$ -napätie na koncoch TEG[V]

$R_e$ -elektrický odpor záťaže [ $\Omega$ ]

### 2.4.1 Maximálny výkon

Z predchádzajúcej rovnice vyplýva, že maximálny výkon bude TEG dosahovať práve vtedy, keď sa externý odpor (elektrický odpor súčastí alebo elektrický odpor záťaže, ktoré budú napájané pomocou TEG) ( $R_e$ ) bude rovnať vnútornému odporu (elektrický odpor samotného TEG ( $R_i$ )). Potom dostaneme vzťah.

$$P_{max} = \frac{U_{out}^2}{4 R_{in}} \quad (10)$$

$P_{max}$ -maximálny elektrický výkon [W]

$U_{out}$ -napätie na koncoch TEG [V]

$R_{in}$ -vnútorný elektrický odpor TEG [ $\Omega$ ]

## 2.5 Tepelné toky studenej a teplej strany

$q_h$  je tepelný tok, ktorý je na teplej strane TEG prijímaný a  $q_c$  je tepelný tok, ktorý z neho na druhej strane bude odvádzaný. Smery týchto tokov sa dajú určiť podľa Seebeckovho zákona (1). Pri generovaní elektrickej energie z tepla je na horúcej strane tepelný tok o hodnote  $q_h$  odvádzaný a na studenej strane je tok  $q_c$  privádzaný.[13]

Vieme, že pre tieto teplá budú platiť nasledovné vzťahy.[14]

$$q_h = \alpha * T_h * I \quad (11)$$

$$q_c = \alpha * T_c * I \quad (12)$$

$q_h$ -tepelný tok na teplej strane [W]

$q_c$ -tepelný tok na studenej strane [W]

$T_h$ -teplota teplej strany [K]

$T_c$ -teplota studenej strany [K]

$I$  -prúd pretekajúci TEG [A]

## 2.6 Joulovo teplo

V TE module sa začne tokom elektrického prúdu generovať tiež stratové Joulovo teplo, označované ako  $q_j$ [W]. Jeho hodnotu určíme pomocou nasledovného vzťahu.[13] Aby sa matematický model blížil skutočnosti, je nevyhnutné s Joulovým teplom počítať. Čo je stratové teplo, vznikajúce prechodom prúdu vodičom.

$$q_j = R_{TEG} * I^2 \quad (13)$$

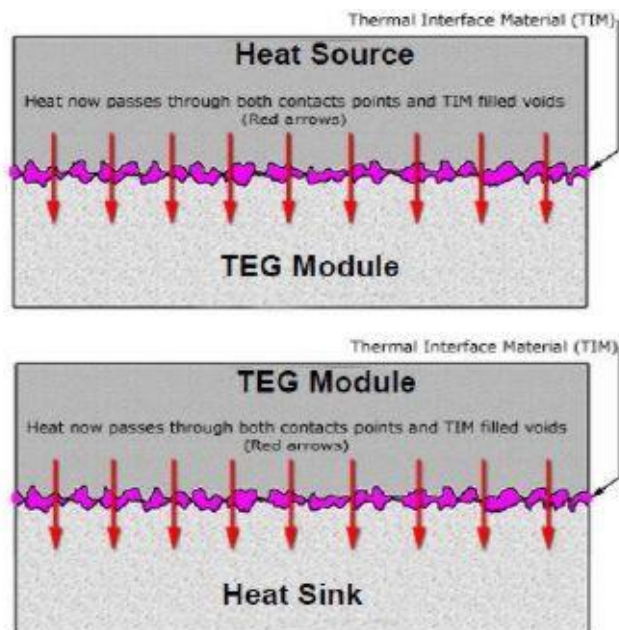
$R_{TEG}$ -tepelný odpor zdroja [K/W]

$q_j$ -Joulovo teplo [W]

$I$ -elektrický prúd [A]

## 2.7 Teplovodivá pasta

Teplovodivá pasta slúži na vyplnenie mikroskopických medzier medzi TEG a zdrojom, ako aj TEG a chladičom. Mohlo by sa zdať, že ide o relatívne rovné a hladké povrchy. Výrobcovia TEG ale odhadujú, že pri nepoužití teplovodnej pasty by sa dotýkali tak z 5% plochy. Ak by sme ju nepoužili tieto medzery, by boli inak vyplnené vzduchom. Vzduch má menšiu tepelnú vodivosť ako spomínaná pasta. Teda by celý prechod tepla TE modulom bol týmto poznačený. Výrobca ďalej uvádza, aby sa TEG nechytal za keramické dosky holými rukami a odporúča plochy pred inštaláciou vyleštiť. [18]



Obr.8 TEG modul inštalovaný za použitia teplovodivej pasty[18]

## 2.8 Zhrnutie

Termoelektrickú premenu ovplyvňuje materiál, ktorý je v TE dvojiciach použitý. Materiály sú hodnotené koeficientom  $Z$  a  $ZT$ , pričom čím vyšší tým lepší. Teplotný rozdiel rozhoduje o tom, aké napätie dostaneme na koncoch TE modulu. Elektrický výkon je potom súčinom elektrického prúdu a napätia. Aby sme mohli dosiahnuť danej teplotnej diferencie, musí sa myslieť na dostatočné odvádzanie tepla prechádzajúceho modulom. Je žiadúce aby teplo zo zdroja malo, čo najmenší efekt na studenú stranu. Toto môže byť dosiahnuté pomocou chladiča, ventilátora, alebo kombinácií.

### 3. Prehľad' prípadových štúdií a ich parametrov

Tento prehľad' bol zostavený za účelom zmapovania možností využitia TEG. Poslúži aj ako inšpirácia, pri hľadaní vhodného konštrukčného riešenia v ďalšom kroku. TEG je možné rozdeliť na základe rozsahu teplôt v ktorom pracujú, čo je stanovené tepelnou odolnosťou komponentov a použitej pájky. Pre účel tejto kapitoly by sme ich tiež mohli rozdeliť aj na základe toho, aký zdroj tepla využívajú - fosílna palivá, rádioizotopové, odpadné teplo atď..

Na koľko tato práca je zameraná na využitie odpadového tepla pomocou TEG, taktiež aj prehľadové štúdie budú ako zdroj tepla využívať odpadové teplo. Bude sa jednať prevažne o priemyselné aplikácie, ktoré budú pracovať za teplôt od 70-350 °C.

#### 3.1 Využitie odpadového tepla vo východo-japonských oceliarniach

Táto prípadová štúdia vychádza z článku

Kuroki, T., Kabeya, K., Makino, K. *et al.* Thermoelectric Generation Using Waste Heat in Steel Works. *Journal of Elec Materi* 43, 2405–2410 (2014). <https://doi.org/10.1007/s11664-014-3094-5>.

Japonský oceliarsky priemysel využíva veľké objemy tepla na spracovanie ocele, avšak po samotnom procese teplo zostáva nevyužitú. Odhaduje sa, že na jednu tonu surovej ocele pripadá 10 GJ odpadového tepla.

Ako zdroj tepla pre termoelektrickú premenu slúži radiálne teplo z jednotlivých železných dosiek, ktoré sú výsledkom kontinuálneho liatia železa. Ako chladiace médium studenej strany TEG bola použitá voda s teplotou 5-10°C. Samotný TEG systém mal rozmery 2m x 4m a bol vzdialený 2 m od železnej dosky (zdroja tepla).

TEG systém bol tvorený komerčnými TEG modulmi KOMATSU, na báze materiálu Bi-Te s rozmermi 50mm\*50mm\*4,2mm, ktorého maximálna účinnosť je 7,2% a maximálny výkon 24W. Čo ako článok uvádza predstavoval v roku 2014 najúčinnější komerčne dostupný TEG. Tieto moduly boli spájané do jednotiek po 16 kusov. Celkovo bolo použitých 896 TEG modulov. Samotnej inštalácii predchádzalo meranie v simulovaných podmienkach. Na základe tohto merania, odhadovaný výkon celého systému bol 10 KW, pri optimálnej teplote  $T_h = 240-250$  °C.

TEG systém, s odhadovaným výkonom 10 KW, bol nainštalovaný do oceliarne. Nasledovalo kontrolné meranie prevádzané pri šírke železnej dosky (zdroja tepla) 1,7m s teplotou 1188 °C. Toto sa prejavilo teplej strane TEG ako  $T_h = 211$  °C. Skutočný výkon bol 9kW pri týchto podmienkach. [7]

### 3.2 Flexibilný termoelektrický generátor pre napájanie uzlu WSN siete

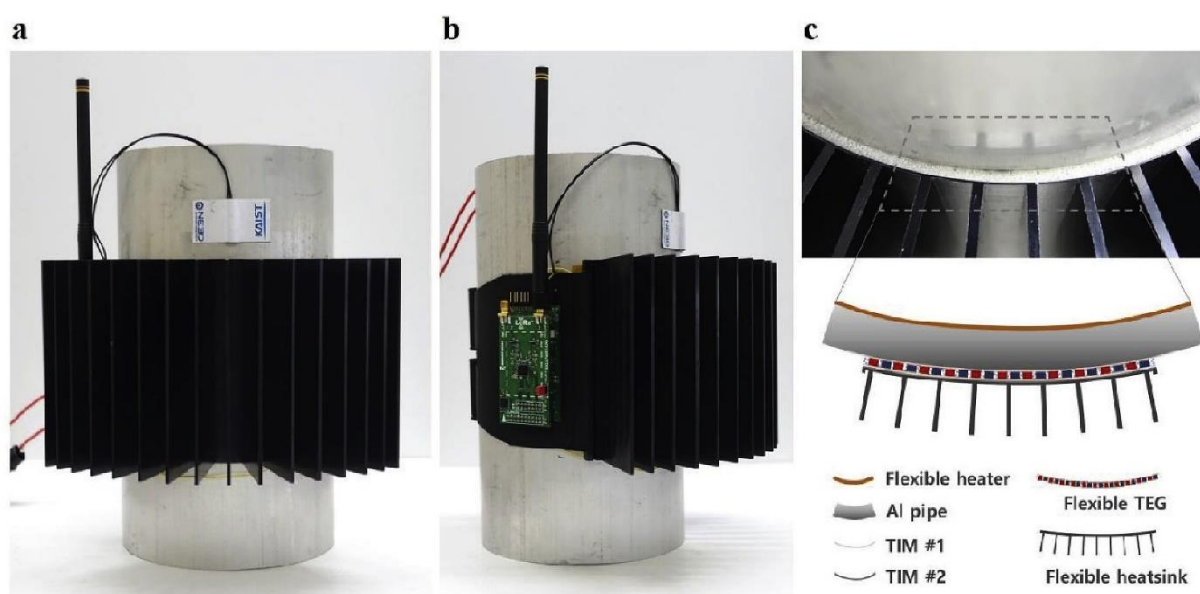
Táto prípadová štúdia vychádza z článku

Kim, Yong Jun, et al. "High-performance self-powered wireless sensor node driven by a flexible thermoelectric generator." *Energy* 162 (2018): 526-533.

Tento generátor bol navrhovaný, tak aby konvertoval tepelnú energiu priamo z teplovodnej trubky bez tvarového adaptéru, alebo inej zásahu do potrubia. Bolo toho dosiahnuté, vďaka flexibilnému designu, ktorý tesne priliehal trubke (Obr.9). Čo umožnilo teplu prechod modulom s čo najmenšími stratami. Jeho účelom bolo napájanie zariadenia WSN (wireless sensor networks). Uzol WSN zaznamenával teplotu vody v potrubí, okolitú teplotu, okolitú vlhkosť a koncentráciu CO<sub>2</sub>. Následne vysielal údaje na vzdialenosť až 500 m (vzdialenosť uvažovaná pri otvorenom priestranstve).

Ďalej tento systém obsahoval baterku na báze Li-Po, ktorá tam bola v prípade zakolísania teploty vody v trubke. Kryla by tak potrebnú spotrebu senzoru a vysielaču. Inokedy by bola nabíjaná práve energiou z f-TEG (flexible thermoelectric generator). Celkový výkon dávaný f-TEG bol 272mW pri teplote trubky 70°C. Systém však dokázal operovať bez použitia batérie aj keď teplota trubky klesla na 50 °C.

Koeficienty ZT pre p-typ polovodiča 0,78 a 0,64 pre n-typ. Ďalej Seebeckov koeficient, elektrická vodivosť a tepelná vodivosť boli pre p-typ 200  $\mu\text{V K}^{-1}$ , 1,7  $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$  a 1100  $\text{S cm}^{-1}$ . Pre n-typ 202  $\mu\text{V K}^{-1}$ , 1000  $\text{S m}^{-1}$  a 1,9  $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ . Zariadenie ako také obsahovalo 200 termoelektrických dvojíc na rozmeroch 79 X 65mm<sup>2</sup> s celkovým koeficientom ZT medzi 0,67-0,69.[8]



Obr.9 fotky kompletného TEG ,senzorov a vysielaču[8]



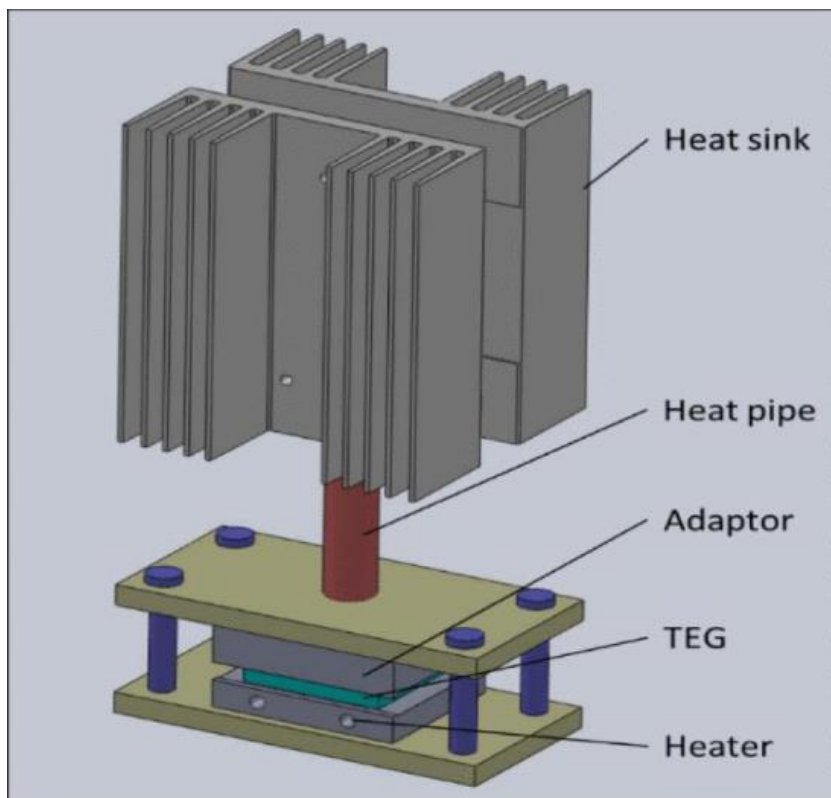
### 3.3 Termoelektrický generátor pre nukleárnu elektrárň

Táto prípadová štúdia vychádza z článku

. Chen *et al.*, "A Thermoelectric Energy Harvesting System for Powering Wireless Sensors in Nuclear Power Plants," in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 63, no. 5, pp. 2738-2746, Oct. 2016, doi: 10.1109/TNS.2016.2606090.

Štúdia pozoruje účinky istej výšky rádioaktivity ( $200 \text{ kGy} \pm 10\%$  (20M rads) na termoelektrický generátor, napájajúci meraciu techniku a hodnotí funkčnosť tohto systému za takýchto podmienok. Boli zostrojené 2 TEG. Prvý bol od spoločnosti Hi-z Technology California s pracovnými teplotami od  $30 - 250 \text{ }^\circ\text{C}$  na báze  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ . Jeho rozmery boli  $2,79 \times 2,79 \text{ cm}^2$ .

Druhý  $\text{PbTe-Bi}_2\text{Te}_3$  TEG v rozmeroch  $5,6 \times 5,6 \text{ cm}^2$  s teplotou  $320 \text{ }^\circ\text{C}$  na teplom konci, čo je teplota odpovedajúca primárnemu vinutiu potrubia v jadrovej elektrárni. Ako chladný koniec pre obidva zariadenia bol použitý chladič o rozmeroch  $125 \text{ mm}$  (šírka)  $\times 150 \text{ mm}$  (dĺžka)  $\times 49 \text{ mm}$  (výška). Kompletnú schému obidvoch nájdeme na Obr.10.



Obr.10 Schéma sústavy TEG pre tento článok [9]

Pri daných teplotách TEG na báze  $\text{Be}_2\text{Te}_3$  dosahoval výkon  $2,25 \text{ W}$  a druhý  $3 \text{ W}$ . Na napájanie všetkej elektroniky WSS (wireless sensing system), ktorý to malo za úlohu napájať, stačilo niečo menej ako  $1 \text{ W}$ .

Štúdia ďalej konštatuje, že TEG sú dostatočne odolné voči radiácii, na koľko dokázali produkovať dostatok energie na poháňanie elektroniky aj pri totálnej dávke žiarenia  $2 \times 10^5 \text{ Gy}$  (20M rads). [9]

### 3.4 Flexibilný TEG v izolácii teplovodnej trubky

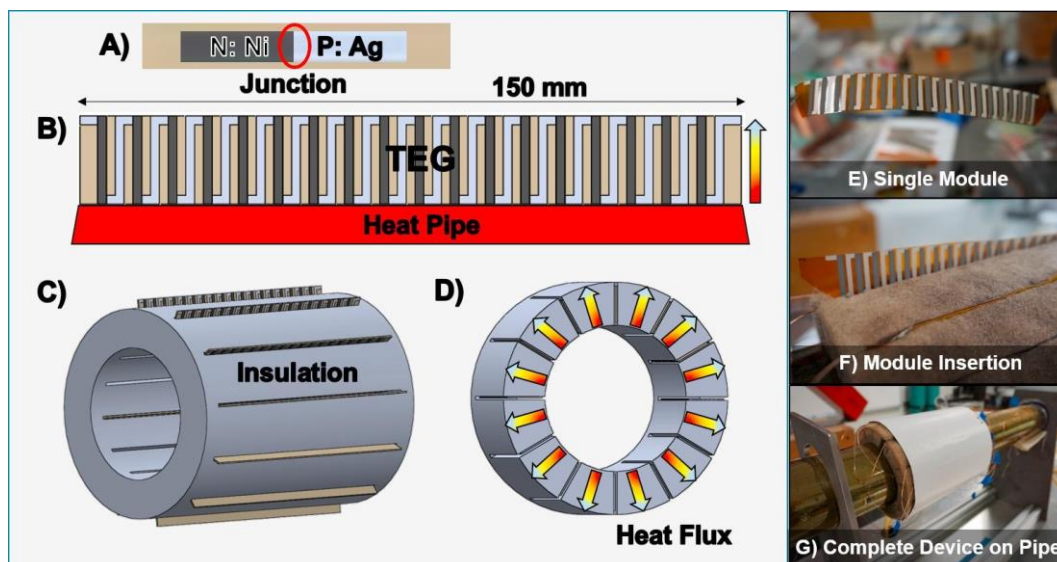
Táto prípadová štúdia vychádza z článku

Brian Iezzi, Krishnamraju Ankireddy, Jack Twiddy, Mark D. Losego, Jesse S. Jur, Printed, metallic thermoelectric generators integrated with pipe insulation for powering wireless sensors, Applied Energy, Volume 208, 2017, Pages 758-765,

V tejto štúdií sa venovali výrobe TEG z niklu a striebra, a následnému mapovaniu TE vlastností. Výrobcovia sa snažili vyhnúť sa použitiu toxických materiálov ako bizmut, telúr, olovo alebo antimón. Čo je jeden s aktuálnych problémov svetu TE premeny. Toxické prvky sú často súčasťou materiálov pre výrobu TE modulov, ktoré disponujú relatívne vysokými koeficientmi Z a ZT.

Ďalej je tu rozobraná experimentálna časť projektu manufaktúry spomínaných TE dvojíc. Kde sa pojednáva o rôznych usporiadaniach dvojíc v TE moduloch a problematike zmeny TE vlastností použitých materiálov pri zmene teploty.

TE dvojice boli zhotovené za pomoci sieťotlač. Zariadenie sa skladalo s 12 TE modulov. Každý modul obsahoval 35 spojení typu Ni/Ag, ktoré boli zapracované do izolácie trúbky vo viacerých smeroch, aby dokázali efektívne využiť odpadové teplo, ako ukazuje Obr.11.



Obr.11 TEG v izolácii teplovodnej trubky [10]

Senzorový obvod sa skladal z dvoch senzorov teploty a vlhkosti, ďalej TEG, DC to DC meniča, kapacitorov a mikrokontrolera.

Cieľom tohto TEG bolo napájať obvod senzorov, ktoré mali možnosť vyslať namerané hodnoty cez Bluetooth na smartphone. Dostatočnú hladinu napätia zabezpečoval DC / DC menič, meniaci hodnoty napätia získaného pomocou TEG na 3,3V. Následne táto získaná energia, s úrovňou napätia (3, 3V), bola použitá na napájanie mikrokontrolera. Namerané údaje o teplote boli vysielané po dobu 10 min s intervalom 30 s. Doba nabitia batérie bola stanovená na 4h pri teplotnom rozdieli  $\Delta T = 127^{\circ}\text{C}$ .

Potom nasleduje kapitola venovaná DC/DC meniču a jeho zapojeniu do obvodu tak, aby sme dostávali konverzný pomer parametrov aký potrebujeme. Článok ďalej konštatuje, že na chladenie studenej strany TEG bol použitý iba okolitý vzduch bez ventilátora. To ponecháva možnosť pre zlepšenie výkonu, ktorí sme schopný dostať. [10]

### 3.5 Zhrnutie poznatkov s prípadových štúdií

Ako prvý článok ukázal, technológia je aplikovateľná aj vo väčšom rozsahu. Druhý článok nás oboznámil s existenciou pokrokového flexibilného designu, ako aj s možnosťou napájania senzorových uzlov WSN sietí. Tretia štúdia popisuje, ako na technológiu TEG pôsobí radiácia a ukazuje zaujímavé použitie TEG na ťažko dostupných miestach. Štvrtý článok nás dovedol k technológii DC/DC meničov potrebných pre lepšiu funkciu elektroniky pri nízkej energetickej hladine. Uvedené poznatky využijeme v nasledujúcej časti práce, ktorá si kladie za cieľ implementáciu modulu TEG ako zdroju pre senzory podmienok okolia.

## 4. Návrh integrace termoelektrického generátoru ve zkušebně NETME Centre.

Cieľom je navrhnuť zdroj energie, ktorý by bol schopný napájať senzor tlaku, teploty a vlhkosti. Na čo by využíval odpadové teplo spalín z mikroturbíny Capstone C30 (Obr.12), ktorá je súčasťou experimentálneho vybavenia Ústavu procesného inžinierstva FSI VUT v Brně.

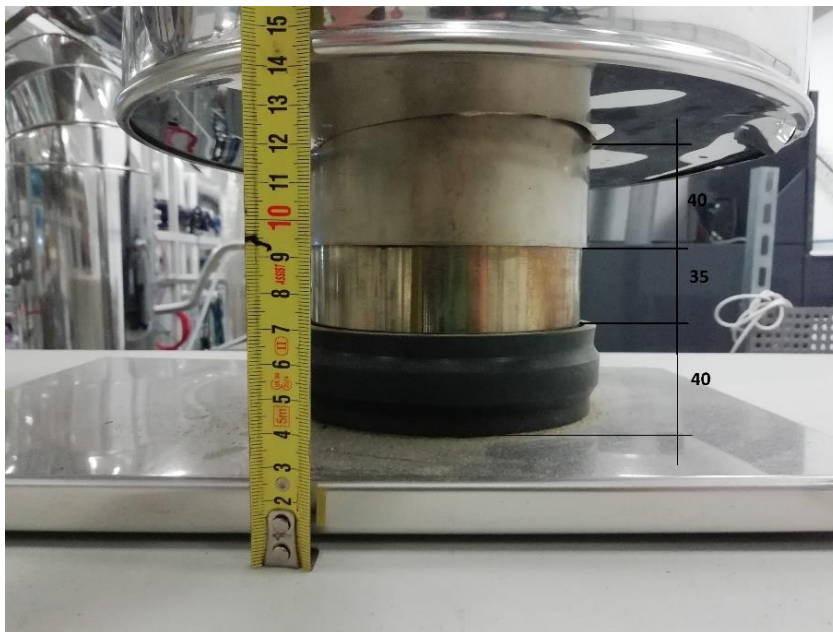
Táto kapitola bude zahŕňať matematický model, ktorý by mal dokázať, že náš návrh bude schopný splniť požadovanú produkciu energie. Kapitola tiež obsahuje proces výberu jednotlivých komponentov a zhrnutie dosiahnutých výsledkov.



Obr.12 Mikroturbína Capstone C30 v Laboratóriu energeticky náročných procesov v NETME centre [23]

#### 4.1 Zdroj tepla pre TEG

Zdrojom tepla sú spaliny z Capstone C30, čo je kogeneračné zaradenie pracujúce na základe Braytonovho cyklu, najčastejšie s rekuperáciou. V našom prípade ide práve o plynovú mikroturbínu vybavenú rekuperátorom, kompresorom paliva a vysokootáčkovým generátorom. Turbína je v rozmeroch 1,79 m x 1,52 m x 0,76 m s hmotnosťou len 405 kg a menovitým výkonom 30 kW. Jej kombinovaná účinnosť výroby elektriny a tepla dosahuje 90 %.[15] Čo je však pre nás podstatné je teplota spalín odvádzaných komínom. Výrobca udáva teplotu odchádzajúcich spalín rovnú 275 °C, ale diplomová práca Lukáša Buřila z pred pár rokov pri meraniach dokázala, že teplota výstupných spalín v plnej prevádzke zariadenia dosahuje až 307 °C. [16] My budeme uvažovať teplotu 300 °C, čo by malo predstavovať nejakú strednú hodnotu oboch informácií.



Obr.13 Odvod spalín z mikroturbíny Capstone C30

Keď už teraz poznáme zdroj tepla resp. zdroj konštantnej teploty, vieme vybrať z rady ponúkaných TE modulov. Pozornosť je sústredená na výkon, cenu, rozmery a predpísané pracovné teploty, stanovené bodom tavenia pájky, ktorá sa v TE module nachádza.

Nakoľko ide o spalinovod kruhového prierezu v začiatkoch práce sa uvažovalo o flexibilnom termoelektrickom module. Z dôvodov využila, čo najväčšej plochy a predišli by sme tým invazívnym metódam ako rezanie a zváranie spalinovodu v snahe o inštaláciu TE modulu. Ďalšou výhodou by bolo, že matrica je ohybná a mäkká. Vedela by teda prilnúť na povrch výrazne lepšie ako pevná matrica. Avšak flexibilné termoelektrické články zatiaľ nie sú rozšírené na takej úrovni, aby sa dali komerčne zakúpiť. Ich zostrojenie by vyžadovalo mnoho úsilia a prostriedkov. Rozhodlo sa teda v prospech termoelektrického článku typu „bulk“.

## 4.2 Voľba termoelektrického modulu

Ako zdroj tepla pre TEG bude použité teplo spalín z mikroturbíny. Teplota spalín bude ďalej označovaná ako  $T_{source}$ , ktorej priemernú hodnotu odhadujeme na 300°C. Na základe tohto parametru musíme zvoliť termoelektrický článok, ktorý dokáže pracovať pri takejto teplote bez poškodenia. Pri výbere TE modulu kladieme dôraz na dosiahnutie cenovo čo najpriaznivejšieho riešenia. Pri výbere bola snaha opierať sa o bakalársku prácu z energetického ústavu [23], ktorej jeden z bodov sa zaoberal poruchami a kvalitou vtedy dostupných TE článkov ale ako sa ukázalo, mnoho z vtedajších dodávateľov sa z trhu stiahlo alebo ich sortiment nie je vhodný pre aplikácie v teplotách okolo 300°C.

V tab. 1 nájdeme termoelektrické články, ktoré by vyhovovali našej aplikácii.

Výrobca	TEC	TEC	TEC	thermonamic	TEC	thermonamic
Model	TEP1-1264-3.4	TEG1-12610-5.1	TEG1-1268-4.3	TEHP1-1264-0.8	TEG1-PB-12611-6.0	TEHP1-1994-1.5
Teplý koniec [°C]	300	300	300	300	350	300
Studený koniec [°C]	30	30	30	30	30	30
Napätie na prázdno [V]	10,8	7,8	10,7	8	9,2	12,6
Zodpovedajúci odpor záťaže [ohm]	5,4	3	5,4	1,59	0,97	3,6
Napätie pri zodpovedajúcej záťaži [V]	5,4	3,9	5,3	4	4,6	6,3
Prúd pri zodpovedajúcej záťaži [A]	1	1,3	1	2,4	4,7	1,75
Výkon pri zodpovedajúcej záťaži [W]	5,4	5,1	5,2	9,8	21,7	11
Tepelný tok prechádzajúci modulom [W]	98,2	113	115	166	310	192
AC odpor meraný pri 27 °C a 1000 Hz [ohm]	3,9	1,3-1,8	2,7-3,6	0,7-1,1	0,42-0,52	1,4-2,0
Rozmery [mm <sup>2</sup> ]	40*40	40*40	35*35	40*40	56*56	40*40
Hustota tepelného toku [W/cm <sup>2</sup> ]		7	9,5	10,4	9,88	12
CENA [Eur]	45,06	26,41	25	-	48	-

Tab.1 Porovnanie TEG modulov [12],[26]

Na základe tohto prieskumu bol vybratý model od firmy TEC TEG1-1268-4.3 [12].

### 4.3 Medzikus

Za účelom dosiahnutia rovnej plochy, na ktorú bude možné TEG pripevniť, je treba inštalovať vhodný medzikus, ktorý zaistí prechod z kruhového prierezu spalínovodu na obdĺžnikový alebo štvorcový. Ukážkový prechodový kus je uvedený na (Obr.14). Tieto prechodové kusy by bolo potreba dva. Medzi nimi by bol umiestnený kúsok obdĺžnikového potrubia s výškou aspoň 3,5 cm. Vhodnejšou alternatívou by zrejme bola výroba medzikusu na mieru aplikácie, aby nebolo nutné príliš zasahovať do nadväzujúcich častí spalínovodu.



Obr. 14 Prechod potrubia štvorhran-kruh

Ďalším krokom je zistenie parametrov elektroniky, ktorú budeme napájať, a to najmä parametre ako hladina napätia, potrebný prúd a pracovná teplota.

### 4.4 Snímač okolitých podmienok

Bolo zistené, že účinnosť mikroturbíny je závislá od vonkajších podmienok okolia.[22] Preto bol ako spotrebič vybraný senzor BME280 od firmy Bosch, ktorý sníma teplotu, tlak a vlhkosť okolia. Nasledujúca tabuľka obsahuje hlavné parametre senzoru. Senzor poskytuje SPI a I<sup>2</sup>C rozhranie. Pre účel tejto práce sú zatiaľ prioritné parametre napájania. Práve s nimi sa budú porovnávať výsledné hodnoty prúdu a napätia generované pomocou TEG (Tab.2).

Parameter	Symbol	Condition	Min	Typ	Max	Unit
Supply Voltage Internal Domains	$V_{DD}$	ripple max. 50 mVpp	1.71	1.8	3.6	V
Supply Voltage I/O Domain	$V_{DDIO}$		1.2	1.8	3.6	V
Sleep current	$I_{DDSL}$			0.1	0.3	$\mu A$
Standby current (inactive period of normal mode)	$I_{DDSB}$			0.2	0.5	$\mu A$
Current during humidity measurement	$I_{DDH}$	Max value at 85 °C		340		$\mu A$
Current during pressure measurement	$I_{DDP}$	Max value at -40 °C		714		$\mu A$
Current during temperature measurement	$I_{DDT}$	Max value at 85 °C		350		$\mu A$
Start-up time	$t_{startup}$	Time to first communication after both $V_{DD} > 1.58 V$ and $V_{DDIO} > 0.65 V$			2	ms
Power supply rejection ratio (DC)	PSRR	full $V_{DD}$ range			$\pm 0.01$ $\pm 5$	%RH/V Pa/V
Standby time accuracy	$\Delta t_{standby}$			$\pm 5$	$\pm 25$	%

Tab.2 špecifikácia elektrických parametrov pre SENZOR BME280[25]

Podľa špecifikácie od firmy Bosch by mal byť senzor schopný fungovania pri teplotách od -40 do +85 °C, a teda bude potrebné na to dbať pri jeho zapojení. Taktiež bude treba dať pozor nato, aby čidlá neboli ovplyvnené zdrojom tepla a skutočne merali okolité podmienky. To bude riešené vyvedením dlhšiemu vodiče z TEG.

#### 4.5 DC/DC Menič

Termoelektrický modul, ako generátor v drvivom množstve aplikácii nefunguje samotný. Dôvodov, ktoré sa za týmto skrývajú môže byť viacej. Ako sme však konštatovali na začiatku práce, TEG nepracujú s takou účinnosťou aby nepretržite napájať jeden či viac spotrebičov.

Predpokladáme, že požiadavky zariadenia by najskôr prevyšovali generované parametre elektrickej energie generovanej pomocou TEG. Je teda za potreby určité formy akumulácie energie, ktorá by energiu zadržala a dokázala ju v potrebnom okamžiku uvoľniť.

DC/DC meniče resp. jednosmerné meniče majú schopnosť meniť hodnoty prúdu a napätia tak, aby boli na požadovanej úrovni, ktorá závisí od parametrov každého meniča. Čím väčší rozsah vstupných a výstupných napätí tým bude jeho cena vyššia. Jodosmerné meniče fungujú na princípe riadeného ukladania a uvoľňovania energie v kapacitoroch. Jodosmerných meničov sa dá využiť pri nízkoteplotných aplikáciách na povýšenie parametrov. Alebo ak by sme mali prípad vysoko teplotnej aplikácie, tak môže slúžiť naopäť na poníženie parametrov. To by malo za následok zvýšenie životnosti batérie a zníženie elektrických strát, ktoré by inak vznikali, keby hodnoty napätia ostali nezmenené.

Bol vybraný jednosmerný menič R-78S3.6-0.1 RECOM (obr.15) Táto konkrétna voľba bola učená až po samotnom výpočte matematického modelu, ktorému sa venuje 4. kapitola práce. A to z dôvodu, že DC/DC meniče majú parameter minimálneho vstupného napätia a či tento parameter splňujeme nemáme šancu vedieť skôr ako po výpočte.



Obr.15 DC/DC menič RECOM[28]

#### 4.6 Chladič

Aby dochádzalo k menšiemu ovplyvneniu teploty studenej strany zdrojom tepla je za potreby chladiča.

Bol vybraný chladič ATS-555350W-C1-R0 od výrobcu Advanced Thermal Solutions s rozmermi 35 mm x 35 mm x 24, 5mm s tepelným odporom 3, 1°C /W. [29]

Pri výbere tejto súčiastky sa išlo strednou cestou. Ak by sme nedosiahli požadovaného rozdielu teplôt bola by súčasť vymenená za výkonnejšiu .

Chladič bude teplovodivou pastou pripevnený k studenej strane TEG podľa špecifikácií výrobcu. Je dôležité ,dodržať odporúčanú hrúbku , v ktorej budeme pastu nanášať. Pretože nedostatočná hrúbka nespĺní, čo požadujeme. Naopak pri príliš hrubej vrstve sa zvyšuje tepelný odpor vrstvy, čo by mohlo viesť k tepelnému poškodeniu TEG, z dôvodu nedostatočného odvodu tepla studenou stranou resp. chladičom.



## 4.7 Tepelná soustava

Tuto soustavu je možné uvažovat jako soustavu sériově raděných tepelných odporů, ako ukazuje Obr.17.

Na základe analógie tepelnej sústavy s elektrickou môžeme poskladať tepelné rovnice pre našu sústavu pomocou Ohmovho zákona a Kirchoffových zákonov.

### 4.7.1 Ohmov zákon

$$U = R * I \quad (14)$$

$U$ - napätie [V]

$R$ - elektrický odpor [ohm]

$I$ -elektrický prúd [A]

Analogicky pre tepelnú sústavu. [14]

$$\Delta T = R_{\text{tepelný}} * q \quad (15)$$

$\Delta T$ -rozdiel teplôt [°C;K]

$R_{\text{tepelný}}$ -tepelný odpor[K/W]

$q$ -tepelný tok [W]

V našom prípade budeme pracovať s tepelnými tokmi a teda budeme používať formu.

$$q = \frac{\Delta T}{R_{\text{tepelný}}} \quad (16)$$

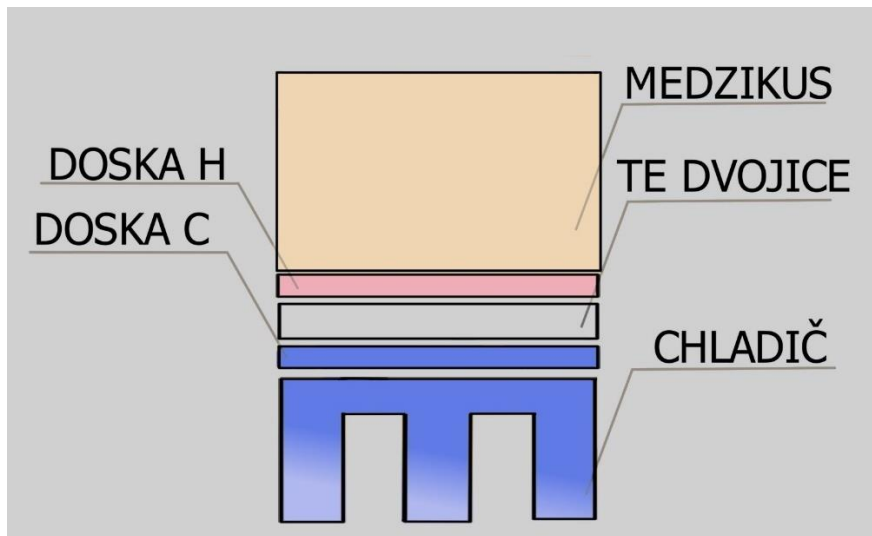
### 4.7.2 Kirchoffove zákony

1. Súčet tepelných tokov (prúdové veličiny) vstupujúcich do uzlu sa rovná súčtu tepelných tokov z uzlu vystupujúcich.

2. Algebraický súčet rozdielu teplôt (rozdielovej veličiny) pri prechode ľubovoľnou uzatvorenou slučkou je nulový.[26]

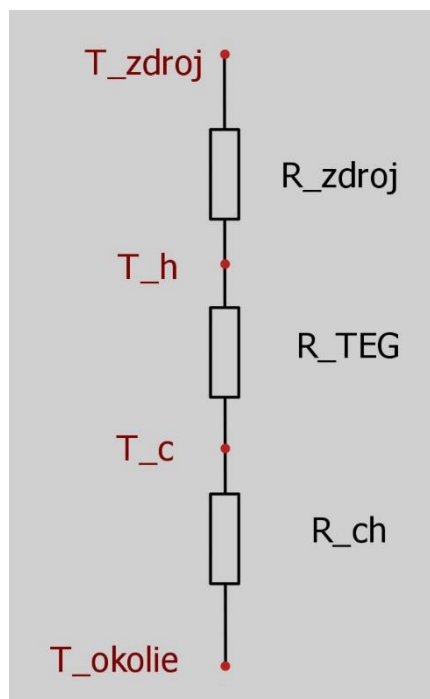
#### 4.8 Matematický model

Na začiatku by bolo dobre si zhrnúť, čo bude naša sústava obsahovať (obr.16) a oboznámiť sa so zavedenými zjednodušeniami tak, aby bol výpočet dostatočne presný a pritom nebol príliš zložitý.



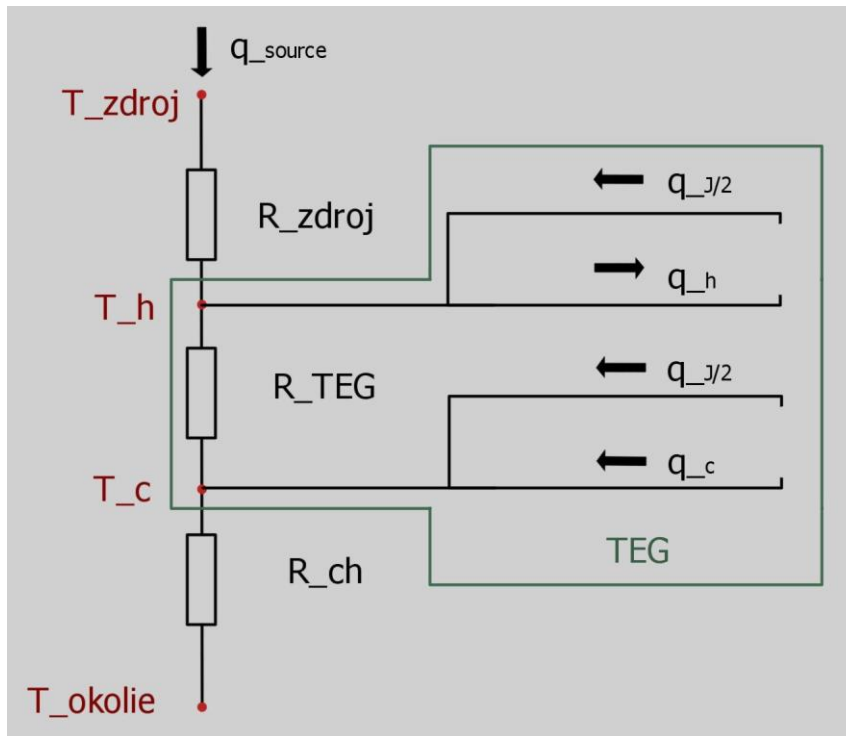
Obr.16 Schéma sústavy TEG

Ako zdroj tepla budeme uvažovať teleso ktoré nám bude poskytovať konštantnú teplotu  $T_{source} = 300\text{ °C}$ , na obr.16 označené žltou farbou. Ďalej už vieme, že nato aby sme mohli náš TEG nainštalovať, bude potreba medzikusu, ktorý s prvou keramikov doskou (na obrázku doska H) tvorí tepelný odpor  $R_{source}$ . Potom nás bude zaujímať teplota, teplej strany TEG a na studenej strany. Tie teda môžeme označiť ako  $T_h$  a  $T_c$ . Tepelný odpor medzi nimi bude  $R_{TEG}$  čo je tepelný odpor TEG ako takého. Chladič, ktorý slúži ako tepelný odpor  $R_{ch}$ . Má za úlohu udržiavanie rozdielu teplôt medzi teplou a studenou stranou. Bráni tak tepelnému poškodeniu TEG z dôvodu nedostatočného odvodu tepla. Toto reprezentuje Obr.17.



Obr.17 Tepelná sústava v počiatčnom stave

Po přidání tepelných toků, přítomných při generování energie, sa nám model pozmení, ako je naznačené na Obr.18.



Obr.18 Tepelná sústava v stave generovania elektrickej energie

#### 4.7 Postup výpočtu

Ako prvé spočítame tepelný tok, ktorý dostaneme z nášho zdroja konštantnej teploty a to použitím vzťahu (15) z čoho dostaneme.

$$q_{source} = \frac{T_{source} - T_h}{R_{source}} \quad (17)$$

Ďalej vieme už z kapitoly o faktoroch ovplyvňujúcich proces TE premeny, že nám bude vznikať joulovo teplo. Tu je ale problém, že ho nemôžeme naznačiť len v jednom z uzlov, tak ho delíme na polovicu a počítame s ním v oboch uzloch.

$$q_{\frac{I}{2}} = \frac{1}{2} * R_{TEG} * I^2 \quad (18)$$

Rovnice pre tepelné toky  $q_h$  a  $q_c$  už poznáme (11),(12).

Tepelné rovnice v jednotlivých uzloch budeme dávať dokopy podľa 1. Kirchoffového zákona. Hovorí, že súčet tepelných tokov vstupujúcich do uzla, sa rovná súčtu tepelných tokov vystupujúcich z uzla.

A teda pre uzol  $T_h$

$$q_{source} + q_{\frac{1}{2}} - q_h - q_{TEG} = 0 \quad (19)$$

A podobne pre uzol  $T_c$

$$q_{TEG} + q_{\frac{1}{2}} + q_c - q_{chladic} = 0 \quad (20)$$

Čo keď rozpíšeme dostávame

$$\frac{T_{source}-T_h}{R_{source}} + \frac{1}{2} * R_{TEG} * I^2 - \alpha * T_h * I - \frac{T_h-T_c}{R_{TEG}} = 0 \quad (21)$$

$$\frac{T_h-T_c}{R_{TEG}} + \frac{1}{2} * R_{TEG} * I^2 + \alpha * T_c * I - \frac{T_c-T_{okolie}}{R_{ch}} = 0 \quad (22)$$

#### 4.7.1 Elektrická rovnica

$$\alpha * I * (T_h - T_c) = (R_{TEG} + R_{load}) * I^2 \quad (23) \quad [14]$$

Nepoznáme však hodnotu prúdu ,ktorý bude obvodom pretekať a ani teploty  $T_c$  a  $T_h$ . Pre uľahčenie výpočtu môžeme na hrubo odhadnúť hodnotu prúdu a následne sústavu riešiť. Sústava dvoch tepelných rovníc (21,22) a jednej elektrickej(23), bola riešená v Exceli za pomoci doplnku riešiteľ.

Po výpočte rovníc (21,22)s odhadnutou hodnotou prúdu  $I_{odhad}$  .Prevedieme výpočet (23), kde dosádzame hodnoty  $T_c$  a  $T_h$ z predchádzajúceho kroku ,čím dostaneme novú hodnotu prúdu  $I_n$ . Následne porovnáваме hodnoty  $I_n$  a  $I_{n+1}$ . Tento krok opakujeme, kým neprídeme k rozdielu hodnôt, ktorý bude dostatočne malý ,aby sa dal považovať za zanedbateľný.

### 4.8 Výpočet a vstupné parametre

Vstupné parametre do výpočtu boli nasledovné

$$T_{source} = 300^{\circ}\text{C}$$

$$R_{source} = 0,1 \text{ K/W}$$

$$R_{TEG} = 1,176 \text{ K/W}$$

$$R_{TEGe} = 3,6 \Omega$$

$$T_{okolie} = 22 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$R_{ch} = 3,1 \text{ K/W}$$

$$\alpha = 0,0396 \text{ V/K}$$

$$I_{odhad} = 0,7 \text{ A}$$

Konečný výsledek sa odhadovanému vzdialil nasledovne.  $T_h = 293,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_c = 221,25 \text{ }^\circ\text{C}$   $I = 0,318 \text{ A}$ . Pričom úroveň napätia produkovaného TEG bola  $U=1,15 \text{ V}$ . Nižšia hodnota prúdu bola následkom nedostatočného chladenia studenej strany chladičom. Ako bolo spomínané v kap 4.6, táto súčasť by mohla byť nahradená inou, čo by nám malo poskytnúť vyšší výkon. A však môžeme konštatovať, že za pomoci DC/DC meniča by sme mali byť schopný vybrané senzory napájať tak aby boli schopné fungovania. Cena takejto zostavy (TE modul + DC/DC menič + chladič) by bola 976,8 Kč.

## 5.Záver

Termoelektrický generátor je technológia, ktorá za použitá polovodičových prvkov dôkaze premieňať tepelnú energiu priamo na elektrickú. Deje sa tak tomu na základe Seebeckého zákona. Proces takejto premeny energie je ovplyvnený predovšetkým zvoleným materiálom a dosiahnuteľným teplotným gradientom. Kvôli relatívne malej účinnosti sú jeho aplikácie limitované. Avšak aj tak nachádza svoje uplatnenie v automobiloch , priemysle , medicíne aj aeronautike. Čo sa budúcnosti tejto technológie týka, závisí na výskume materiálov vhodných na toto použitie .

Veľa krát TEG v daných podmienkach neprodukuje požadované parametre elektrickej energie ako bolo vidieť aj v prehľade prípadových štúdií. tento problém do istej miery rieši technológia jednosmerných meničov.

Hlavným cieľom prace bol návrh termoelektrického generátoru. Jednalo by sa o zaradenie TEG ako zdroja pre napájanie senzorov absolútneho tlaku, vlhkosti a teploty okolia mikroturbíny, ktorej odvod spalín by slúžil ako tepelný zdroj pre spomínaný TEG. Cena zostavy TEG(chladič, DC/DC menič, TE modul) bola stanovená na 976,8 Kč.

Zmyslupnosť inštalácie vieme odhadnúť z výsledných hodnôt získaných z matematického modelu resp. riešenia tepelných rovníc a elektrickej rovnice. Ich riešením dostaneme približné hodnoty prúdu a teploty teplého a studeného konca, na základe ktorých dokážeme zistiť celkový elektrický výkon a napätie .

Po riešení sústavy rovníc sme dostali hodnoty .  $T_h = 293,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_c = 221,25 \text{ }^\circ\text{C}$   $I = 0,318 \text{ A}$  pri napätí  $U = 1,15\text{V}$ , čo po použití jednosmerného meniča by bolo dostatočné na napájanie nami zvoleného senzoru. Veľmi zaujímavé bude porovnanie týchto parametrov s experimentálnym meraním, až bude zostava nainštalovaná.

## Zdroje

- [1] He, Jian, and Terry M. Tritt. "Advances in thermoelectric materials research: Looking back and moving forward." *Science* 357.6358 (2017).
- [2] JAZIRI, Nesrine, Ayda BOUGHAMOURA, Jens MÜLLER, Brahim MEZGHANI, Fares TOUNSI a Mohammed ISMAIL. A comprehensive review of Thermoelectric Generators: Technologies and common applications. *Energy Reports* [online]. 2019. DOI: 10.1016/j.egy.2019.12.011. ISSN 23524847.
- [3] ROWE, D. M. (ed.). *Thermoelectrics handbook : macro to nano*. 1st ed. [Boca Raton] : CRC Press, 2006. 1014 s. ISBN 978-0849322648.
- [4] ŠTETINA, J. *Termoelektrický generátor*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 50 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.
- [5] FRANK, V. *Zařízení pro testování termoelektrických modulů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 88 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
- [6] BRÁZDIL, Marian. *Peltierův článek pro chlazení malých výkonů: bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 57 s. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
- [7] Kuroki, T., Kabeya, K., Makino, K. *et al.* Thermoelectric Generation Using Waste Heat in Steel Works. *Journal of Elec Materi* **43**, 2405–2410 (2014). <https://doi.org/10.1007/s11664-014-3094-5>
- [8] Kim, Yong Jun, et al. "High-performance self-powered wireless sensor node driven by a flexible thermoelectric generator." *Energy* 162 (2018): 526-533.
- [9] J. Chen *et al.*, "A Thermoelectric Energy Harvesting System for Powering Wireless Sensors in Nuclear Power Plants," in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 63, no. 5, pp. 2738-2746, Oct. 2016, doi: 10.1109/TNS.2016.2606090.
- [10] Brian Iezzi, Krishnamraju Ankireddy, Jack Twiddy, Mark D. Losego, Jesse S. Jur, Printed, metallic thermoelectric generators integrated with pipe insulation for powering wireless sensors, *Applied Energy*, Volume 208, 2017, Pages 758-765,
- [11] GOLDSMID, H. *Introduction to thermoelectricity*. New York: Springer, 2010. Springer series in materials science, 121. ISBN 36-420-0715-5.
- [12] <https://thermoelectric-generator.com/product/teg1-1268-4-3/>
- [13] NGUYEN, M. *Termoelektrický generátor pro nabíjení mobilních zařízení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 31 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.
- [14] ŠTETINA, J. *Termoelektrický generátor*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 50 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.
- [15] SLOVÁK, R. *Technicko-ekonomické hodnocení systému pro využití odpadního tepla z plynové mikroturbíny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 83 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vítězslav Máša, Ph.D..

- [16] BUŘIL, Lukáš. Experimentální ověření kogeneračního systému na bázi plynové mikroturbíny. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zavprace/detail/117176>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Vítězslav Máša.
- [17] TRÍNÁCTÝ, J. Termoelektrický generátor pro spalínový tah kotle. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 63 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marian Brázdil
- [18] <https://thermoelectric-generator.com/product/teg1-1268-4-3/>
- [19] Anna I. Hofmann, ... Christian Müller, in [Handbook of Organic Materials for Electronic and Photonic Devices \(Second Edition\)](#), 2019
- [20] <https://www.eletimes.com/new-flexible-thermoelectric-generator-module-is-a-silver-bullet-to-fix-waste-energy-issues>
- [21] <https://www.ennomotive.com/reclaimed-thermovoltaic-a-potentially-disruptive-technology-for-energy-efficiency>
- [22] HÁJKOVÁ, Petra. Analýza faktorů ovlivňujících provoz plynové mikroturbíny. Brno, 2020. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/123746>. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství, 43 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Eva KonečnáZdroje obrázkov
- [23] Máša, V., Bobák, P. & Vondra, M. Potential of gas microturbines for integration in commercial laundries. *Oper Res Int J* **17**, 849–866 (2017). <https://doi.org/10.1007/s12351-016-0263-8>
- [24] REŠILIÁNO, T. Životnost a spolehlivost termoelektrických modulů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 51 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marian Brázdil.
- [25] [https://techfun.sk/produkt/bme280-senzor-teploty-tlaku-a-vlhkosti-vzduchu/?gclid=Cj0KCQjw7pKFBhDUARIsAFUoMDb75Q5UrEXGqCAutLt\\_YHqKXuNIFSfzL0Pvz\\_r8QInW0z08tCO6sJcaAIYNEALw\\_wcB](https://techfun.sk/produkt/bme280-senzor-teploty-tlaku-a-vlhkosti-vzduchu/?gclid=Cj0KCQjw7pKFBhDUARIsAFUoMDb75Q5UrEXGqCAutLt_YHqKXuNIFSfzL0Pvz_r8QInW0z08tCO6sJcaAIYNEALw_wcB)
- [26] <http://www.thermonamic.com/>
- [27] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky. 1. české vyd., 2. dotisk. Překlad Jan Obdržálek, Bohumila Lencová, Petr Dub. V Brně: Prometheus, 2006. ISBN 80-214-1868-0.
- [28] <https://recom-power.com/en/products/switching-regulators/rec-p-R-78S3.6-0.1.html?8>
- [29] <https://www.mouser.sk/ProductDetail/Advanced-Thermal-Solutions/ATS-55350W-C1-R0?qs=MLItCLRbWsyRL6%2FF8pYJ2g==>

## Prehľad použitých veličín

$\alpha_{AB}$ - Seebeckov koeficient spojenia materiálov A a B [V/K]

$\lambda$ -tepelná vodivosť [W/m<sup>2</sup>K]

$\Delta T$ -rozdiel teplot [K, °C]

$I$ -elektrický prúd [A]

$N$  -počet termoelektrických dvojíc [-]

$\Pi_{AB}$ -Peltierov koeficient spojenia materiálov A a B [V]

$P_{max}$ -maximálny výkon[W]

$P_{out}$ -dosiahnutý výkon[W]

$R$ -elektrický odpor[Ω]

$R_e$ -elektrický odpor záťaže[Ω]

$R_{ch}$ -tepelný odpor chladiča [K/W]

$R_{in}$ -vnútorný elektrický odpor [Ω]

$R_{load}$ -elektrický odpor záťaže [Ω]

$R_{source}$ -tepelný odpor zdroja [K/W]

$R_{TEG}$ -tepelný odpor TEG [K/W]

$R_{tepelný}$ -tepelný odpor[K/W]

$\tau_A$ -Thompsnov koeficient materiálu A [VK]

$\tau_B$ - Thompsnov koeficient materiálu B [VK]

$T_c$ -teplota studeného konca [K]

$T_h$ -teplota teplého konca [K]

$T_{okolie}$ -teplota okolia [K]

$T_{source}$ -teplota spalín [K]

$q_c$ -tepelný tok na studenej strane [W]

$q_h$ -tepelný tok na teplej strane [W]

$q_{chladic}$ - tepelný tok pretekajúci chladičom[W]

$q_j$ -Joulovo teplo

$q_{\frac{j}{2}}$ -polovičné Joulovo teplo [W]

$q_{TEG}$ - tepelný tok pretekajúci TEG [W]

$Q$ -teplo [J]



$U$ -elektrické napätie [V]

$U_{out}$ - napätie produkované TEG [V]

$Z$ - indikátor efektívnosti materiálu [-]

$ZT$ - indikátor efektívnosti materiálu vzťahnutý k teplote [-]