VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
**BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
**ENERGETICKÝ ÚSTAV**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
**ENERGY INSTITUTE**

# MOŽNOSTI VYUŽITÍ ODPADNÍHO TEPLA VÝFUKOVÝCH PLYNŮ SPALOVACÍCH MOTORŮ

POSSIBILITIES OF WASTE HEAT RECOVERY FROM INTERNAL COMBUSTION ENGINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR´S THESIS

AUTOR PRÁCE — PETR KŘIVÁK
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — ING. MARIAN BRÁZDIL
SUPERVISOR

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav
Akademický rok: 2011/12

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Petr Křivák

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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:

**Možnosti využití odpadního tepla výfukových plynů spalovacích motorů**

v anglickém jazyce:

**Possibilities of waste heat recovery from internal combustion engines**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce analyzuje aktuální stav využití odpadního tepla výfukových plynů spalovacích motorů a možné trendy jeho vývoje.

Cíle bakalářské práce:

1. Popis současného stavu a energetických nároků automobilové dopravy
2. Přehled možných technických řešení využívajících odpadního tepla spalin
3. Detailní popis konstrukce automobilového termoelektrického generátoru
4. Zhodnocení přínosu užití termoelektrického generátoru

Seznam odborné literatury:

[1] KALČÍK, J.; SÝKORA, K. Technická termomechanika. 1. vyd. Praha: Československá akademie věd, 1973. 540 s. ISBN 104-21-825
[2] ROWE, D. M. CRC handbook of thermoelectrics. 1st ed. CRC Press, 1995. 701 s. ISBN 978-0849301469
[3] Odborné publikace z databáze Science Direct
[4] Firemní literatura výrobců automobilů

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Marian Brázdil

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/12.

V Brně, dne 10.11.2011

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

# Abstrakt

Zvyšující se nároky na automobilovou dopravu kvůli snížení dopadu na životní prostředí a spotřeby fosilních paliv, vedly ke snaze zvýšení účinnosti spalovacího procesu a automobilu jako celku. Jednou z možností jak tohoto dosáhnout je využít odpadního tepla spalovacího procesu a to především odpadního tepla výfukových plynů. Toto teplo může být přeměněno na elektrickou energii, jejíž spotřeba u moderních automobilů vzrůstá.

Předkládaná práce pojednává o možnostech využití odpadního tepla výfukových plynů spalovacího motoru automobilu. Zaměřená je na aplikace vyrábějící elektrickou energii. V práci je zanalyzován současný stav automobilové dopravy a poté uveden přehled možných technologických řešení využití odpadního tepla výfukových plynů. Stěžejní část je věnována termoelektrickým generátorům, jejich konstrukci a přehledu konstrukčních řešení. Na závěr je provedená energetická bilance při použití termoelektrického generátoru.

# Klíčová slova

termoelektrický generátor, automobil, termoelektrická přeměna, Seebeckův jev, odpadní teplo, výfukové plyny, spalovací motor, Rankin-Clausiuv cyklus, možnosti využití

# Abstract

Increasing demands for vehicular traffic to reduce the environmental impact and consumption of fossil fuels, led an effort to increase the efficiency of the combustion process and the car as a whole. One way to achieve this is to use the waste heat of the combustion process, especially waste heat of exhaust gases. This heat can be converted into electrical energy. Consumption of electricity in modern cars is increasing.

The presented work deals with the possibilities, how to using waste heat of exhaustgases from internal combustion engine. Focused on application of producing electricity. The paper analyzed the current state of car traffic, and then provides an overview of possible technological solutions using waste heat of exhaust gases. The main part is devoted to thermoelectric generators, their construction and possible design. In conclusion is made the energy balance with use thermoelectric generator.

# Keywords

thermoelectric generator, car, thermoelectric conversion, Seebeck effect, waste heat, exhaust gases, combustion engine, Rankin-Clausius cycle, possibility of using

## Bibliografická citace

KŘIVÁK, P. *Možnosti využití odpadního tepla výfukových plynů spalovacích motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marian Brázdil.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Možnosti využití odpadního tepla výfukových plynů spalovacích motorů vypracoval samostatně s použitím literatury a pramenů uvedených v seznamu.

V Brně dne 25. května 2012 …….……..……..

Petr Křivák

# Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Ing. Marianu Brázdilovi za vstřícný přístup a cenné připomínky a rady, při vypracování bakalářské práce.

# Obsah

1. ÚVOD ..... 10
2. SOUČASNÝ STAV AUTOMOBILOVÉ DOPRAVY ..... 11
3. DRUHY POUŽÍVANÝCH POHONNÝCH JEDNOTEK ..... 13
3.1 Benzinové zážehové motory ..... 16
3.2 Naftové vznětové motory ..... 17
3.3 Porovnání tepelných bilancí motorů ..... 18
4. PŘEHLED MOŽNÝCH TECHNICKÝCH ŘEŠENÍ VYUŽÍVAJÍCÍCH ODPADNÍHO TEPLA SPALIN ..... 19
4.1 Stirlingův motor ..... 20
4.2 Rankin-Clausiův cyklus ..... 21
4.2.1 Studie RC cyklu od Hondy ..... 21
4.2.2 Studie ORC cyklu Ford Motor Company ..... 22
4.2.3 Studie RC cyklu BMW ..... 23
4.3 Turbosteamer ..... 24
5. TERMOELEKTRICKÉ GENERÁTORY ..... 26
5.1 Princip termoelektrické přeměny ..... 26
5.2 Konstrukce termoelektrického generátoru ..... 29
5.3 Termoelektrické materiály ..... 30
5.4 Aplikace termoelektrických generátorů ..... 34
5.4.1 TEG University Karsruhe ..... 34
5.4.2 TEG Hi-Z Inc. ..... 35
5.4.3 Nissan Motors Inc. ..... 36
5.4.4 TEG Clarkson University ..... 37
5.4.5 BMW ..... 39
5.4.6 General Motors ..... 41
5.4.7 Ostatní výrobci ..... 42
5.5 Výhledy do budoucna ..... 43
5.6 Energetická bilance při použití TEG ..... 43
6. ZÁVĚR ..... 44
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ ..... 46
SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK ..... 51

SEZNAM OBRÁZKŮ ..... 52
SEZNAM GRAFŮ ..... 53
SEZNAM TABULEK ..... 53

# 1. ÚVOD

V dnešní době je kladen důraz na maximální využití energetických zdrojů z důvodu neustálého růstu populace a její zvyšujících se požadavků na elektrickou energii, která je v kontrastu s neustále se snižující zásobou fosilních paliv a neobnovitelných zdrojů energie.

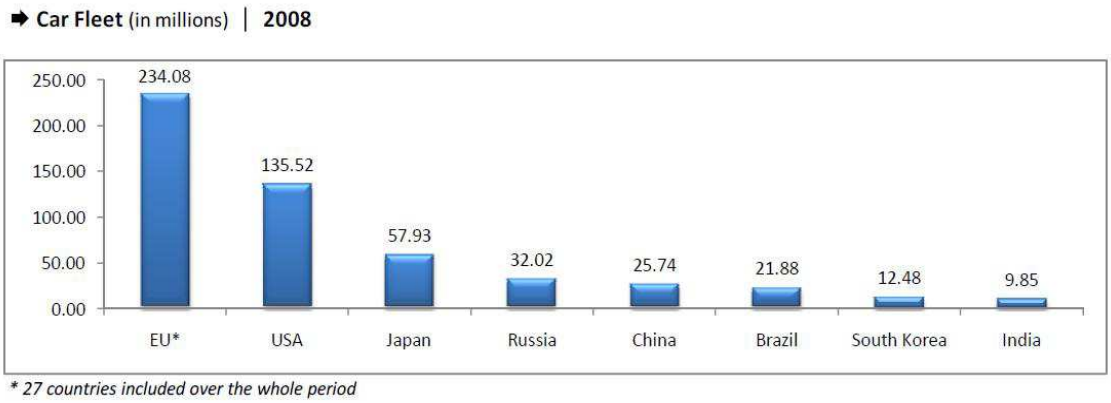
Z těchto důvodů je snaha získat nové zdroje energie, nebo zvýšit účinnost zdrojů stávajících. Tato snaha se promítá do všech průmyslových odvětví a to i do automobilového průmyslu. Zde je také velký tlak ze strany ekologie a zvyšujícího se znečištění životního prostředí v důsledku neustálého nárůstu automobilové dopravy.

U automobilů je spalovací motor nejpoužívanější pohonnou jednotkou. Používá se v široké škále vozidel od osobních a nákladních automobilů přes vozidla hromadné dopravy až po stavební a zemědělské stroje. Spalování paliva v těchto motorech je ale značně nedokonalé. Z energie dodané palivem při spalování se využije jen část na užitečný výkon a zbytek energie odchází nevyužito. Velká část energie odchází do okolního ovzduší chlazením a odvodem výfukových plynů. Další ztráty vznikají třením pohyblivých částí motoru. Jen malá část energie je využita k vytápění kabiny nebo pohonu turbodmychadla.

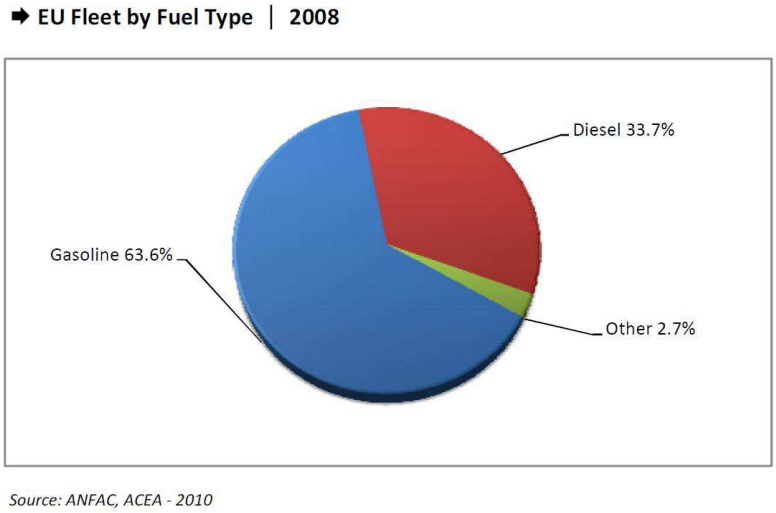
Vzniklé odpadní teplo je možné využít mnoha způsoby, například k přeměně na elektrickou energii, nebo pro jiné účely. To vše závisí na použité technologii.

# 2. SOUČASNÝ STAV AUTOMOBILOVÉ DOPRAVY

Ze statistik Evropské asociace výrobců automobilů (ACEA) vyplývá, že v Evropě je používáno přibližně 234 mil. automobilů. Z toho benzínové zážehové motory tvoří 63,6% podíl a naftové vznětové 33,7%. Zbytek tvoří ostatní typy [4].

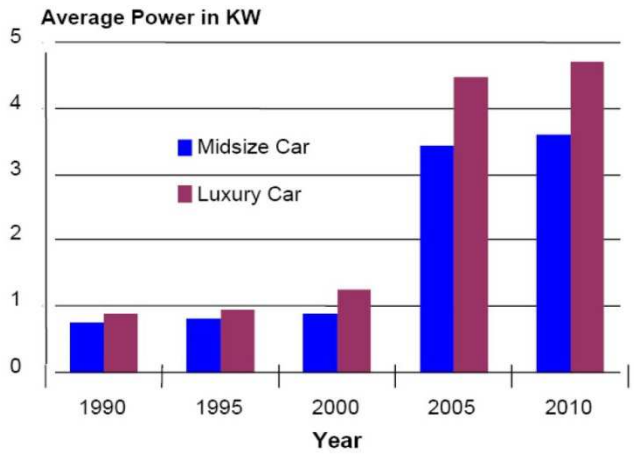



**Graf.1:** *Velikost vozového parku v členských zemích asociace evropských výrobců automobilů ACEA [4]*



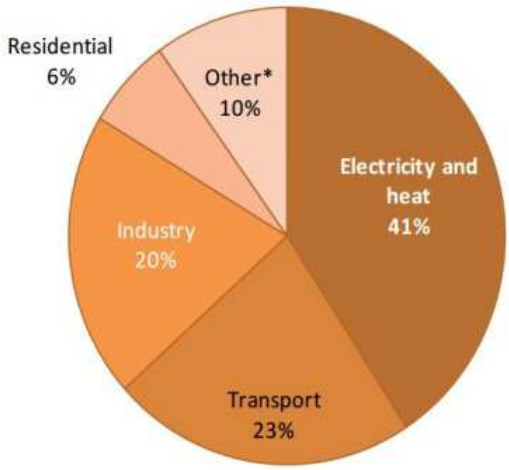

**Graf.2:** *Rozdělení vozového parku v Evropě podle použitých pohonných jednotek [4]*

V moderních automobilech je používáno čím dál více elektroniky, která je určená jak pro zlepšení jízdních vlastností automobilu (kontrola stability, ABS), tak pro větší pohodlí řidiče a pasažérů (elektronické polohování sedadel, navigace). Zvyšující se počet elektronických zařízení má za následek zvýšené požadavky na množství dodávané elektrické energie. Na Graf.3 je vidět, jak se v průběhu let zvyšovaly tyto energetické nároky [6].




**Graf.3:** *Požadavky na elektrickou energii moderních automobilů [6]*

Z nutnosti větší dodávky elektrické energie plyne také větší spotřeba paliva, jelikož pro výrobu elektrické energie se v automobilech používá alternátor, který je poháněn motorem. Alternátor je zahrnut v mechanických ztrátách energetické bilance spalovacího motoru. Spotřeba automobilů se udává ve vztahu na ujetou dráhu. Spotřeba na ujetou dráhu 100 Km se určuje podle směrnice 93/116/ES , ta je vázána na Evropskou unii. Podle metodiky danou touto směrnicí získáváme spotřebu ve smíšeném provozu, která je vypočtena jako vážený průměr spotřeby v městském provozu a spotřeby mimo město. Při této metodě se neměří množství paliva přímo, ale vypočítává se z množství emisí $CO_2$, HC, a CO obsažených ve výfukových plynech[1]. V dnešní době je velký tlak na snížení emisí vzniklých při spalování fosilních paliv z důvodu znečištění ovzduší a životního prostředí těmito látkami. Nejsledovanější emisní látkou je oxid uhličitý $CO_2$. Podle statistik [7] bylo v roce 2009 vyprodukováno ve světě 28 999 Mt $CO_2$ spalováním fosilních paliv (uhlí, oleje, plyn) a z toho měly 23% na svědomí dopravní prostředky. Ze statistik vyplývá, že se tato hodnota oproti minulým letům snížila a je snaha, aby tato tendence přetrvala. Z toho důvodu se výrobci automobilů snaží snižovat spotřebu automobilů [8].




**Graf.4:** *Hlavní producenti podílející se na tvorbě CO2[8]*

# 3. DRUHY POUŽÍVANÝCH POHONNÝCH JEDNOTEK

Pohon automobilu při jízdě zajišťuje motor. Největší podíl dnes vyráběných motorů je spalovacích, ale s nástupem elektromobilů a hybridních automobilů se zvyšuje podíl elektromotorů. Ty však stále tvoří zanedbatelnou část[1].

Spalovací motor je tepelný hnací stroj, ve kterém se tepelná energie získaná ze spalování plynných, nebo kapalných paliv mění na mechanickou práci. Tato změna je provedena pomocí pracovní látky (plyn), která je nositelkou tepelné energie[1];[3].

Spalovací motory dělíme do tří základních skupin:

- pístové spalovací motory
- spalovací turbíny
- reaktivní motory

Motory dále dělíme podle druhu paliva na:

- motory spalující plynná paliva (např. zemní plyn, propan)
- motory spalující kapalná paliva (např. benzín, nafta)

Podle způsobu zažehnutí se motory dělí na:

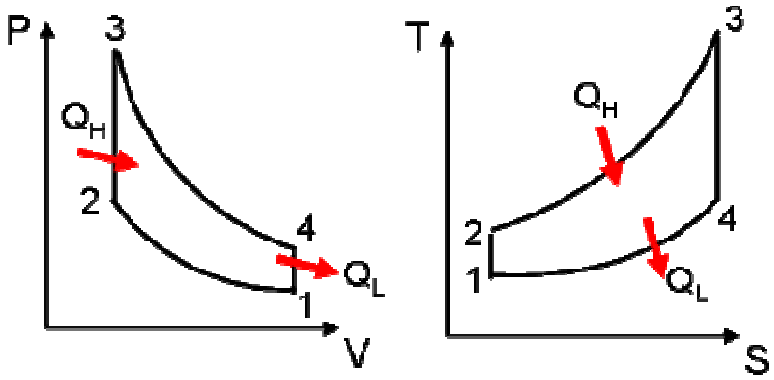
- motory s umělým zažehnutím (zážehové)
- motory se samočinným vznícením (vznětové)

Většina dnes používaných spalovacích motorů tvoří pístové spalovací motory na kapalná paliva. Při přeměně tepelné energie na energii mechanickou, probíhají termodynamické děje, při nichž se mění stav pracovní látky, což jsou u spalovacích motorů výfukové plyny vzniklé spalováním paliva. Do těchto motorů není palivo přiváděno kontinuálně, jako například u spalovacích turbín, ale periodicky. Z toho vyvstávají určité problémy jako například tvorba emisí dusíku z nedokonalého spalování. Všechny pístové spalovací motory pracují s otevřenými pracovními cykly, to znamená, že na začátku každého cyklu přivádíme novou pracovní látku se stejnými počátečními termodynamickými parametry, ta vykoná v motoru práci a odchází z něj s nižší teplotou a tlakem[1];[2];[3].

Principem fungování pístových spalovacích motorů je spalování paliv přímo ve válci spalovacího motoru. Do válce je nasáta směs paliv se vzduchem, nebo pouze vzduch, to záleží na druhu motoru. Poté následuje kompresní zdvih, na jehož konci nastává zážeh palivové směsi jiskrou v případě zážehového motoru, nebo vznícení paliva kompresním teplem vzduchu u vznětových motorů. Termodynamické děje probíhající uvnitř motoru popisují teoretické cykly. Tyto cykly se dělí na výbušné s hořením za konstantního tepla, rovnotlaký s hořením za konstantního tlaku a cyklus smíšený, při kterém dochází k hoření částečně za konstantního objemu a částečně za konstantního tlaku[3].

Ottův (výbušný) cyklus

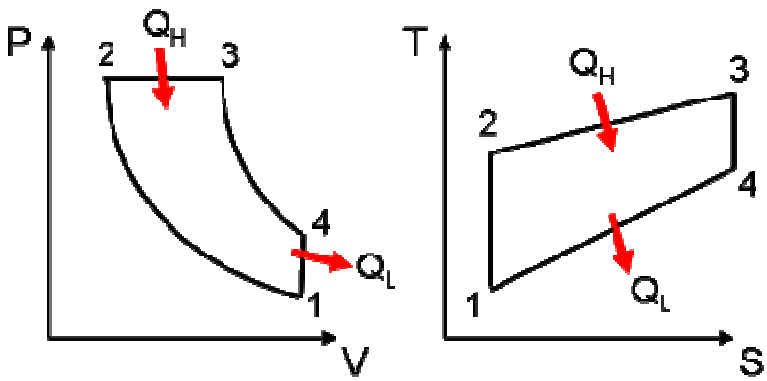
Ottův cyklus popisuje teoretický průběh spalování v motorech na plynná nebo lehce odpařitelná paliva. Cyklus se skládá ze dvou izochor a dvou adiabat. Při prvním zdvihu válce se nasává směs paliva se vzduchem. Po uzavření sacího ventilu nastává druhý zdvih, při němž se nasátá směs adiabaticky stlačí, na jeho konci se směs uměle zažehne a nastává izochorické hoření. Při hoření se zvýší tlak na tolik, že donutí píst k třetímu zdvihu, při němž dochází k adiabatické expanzi. Na konci tohoto zdvihu se otevřou výfukové ventily a dojde k izochorickému poklesu tlaku při odchodu výfukových plynů ven z válce motoru, ty jsou zároveň vytlačovány při posledním čtvrtém zdvihu pístu. Ottův cyklus je pouze teoretický a má pouze přiblížit ke skutečnému cyklu zážehového motoru, proto se v p-V diagramu nezobrazují zdvih pístu při sání paliva a vytlačování zplodin jak je vidět na Obr.1[3].




**Obr.1:** *Průběh Ottova cyklu[38]*

Dieslův (rovnotlaký) cyklus

Dieslův cyklus je tvořen dvěma adiabatami, jednou izochorou a izobarou. U tohoto cyklu se využívá mnohem vyššího kompresního stupně než u Ottova cyklu. Nasátý vzduch se stlačí natolik, aby kompresní teplota přesáhla teplotu vznícení paliva. Palivo je vstříknuto kompresorem do stlačeného vzduchu, tím dojde k vznícení. Hoření probíhá za konstantního tlaku. Následuje adiabatická expanze a izochorický pokles tlaku při otevření výfukového ventilu.[3]




**Obr.2:** *Průběh Dieslova cyklu [38]*

Sabatův (smíšený) cyklus

Sabatův cyklus je kombinací obou předchozích cyklů a využívá se v moderních dieselových motorech, ve kterých bylo zdokonaleno vstřikování paliva (tzv. přímé vstřikování). Hoření paliva je z části izochorické a z části izobarické. Sabatův cyklus se skládá z adiabatické komprese, izochorického a izobarického přívodu tepla, adiabatické expanze a izochorického odvodu tepla[3].

Výše uvedené cykly nám popisují pouze teoretický pracovní oběh, skutečný oběh se od teoretického zásadně liší. Skutečné pracovní oběhy nám znázorňují oběh benzínového zážehového motoru a Dieslového vznětového motoru, které jsou popsány níže.

Dalším důležitým faktorem u spalovacích motorů je jejich tepelná bilance, protože na efektivní práci spalovacího motoru je použita pouze část tepla dodaného při spalování paliva. I přes využití dnešních moderních technologii je využití energie paliva značně nedokonalá a dochází k mnoha ztrátám. Podle [2] nám využití tepla paliva charakterizuje rovnice energetické rovnováhy, která může být vyjádřena jako:

$$Q_p = Q_e + Q_{ns} + Q_{ch} + Q_s + Q_v + Q_m$$

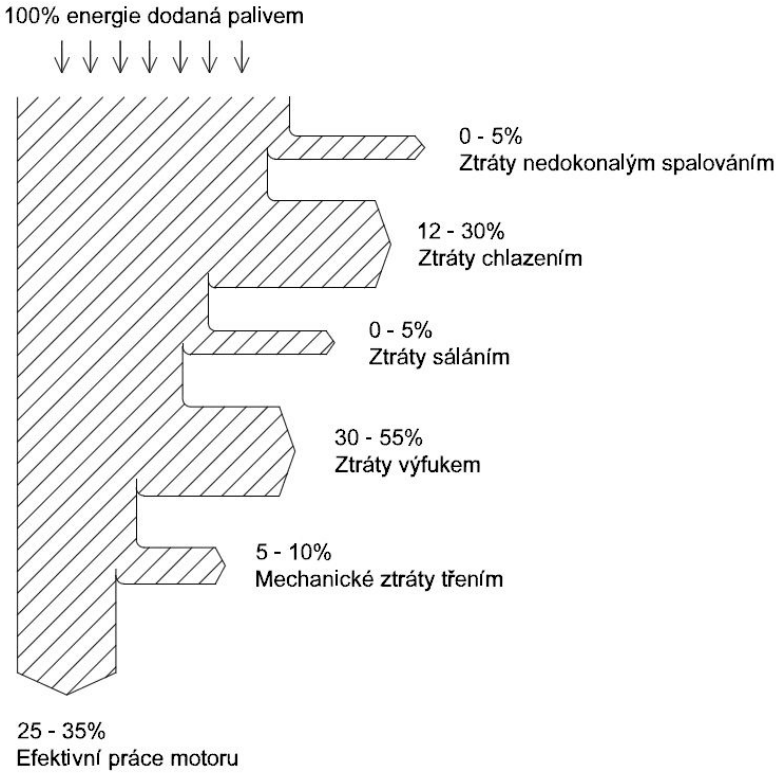
kde $Q_p$ je množství energie přivedené palivem a $Q_e$ je teplo přeměněné na efektivní práci motoru využité pro pohon vozidla a zbytek tepla jsou ztráty ve kterých je zahrnuto:

- $Q_{ns}$ – ztráty nedokonalým spalováním
- $Q_{ch}$ – ztráty chlazením
- $Q_s$ – ztráty sáláním
- $Q_v$ – ztráty výfukem
- $Q_m$ – ztráty mechanickým třením

## 3.1 Benzinové zážehové motory

Čtyřdobé zážehové motory jsou motory na lehká kapalná paliva a to především benzín. Pracují na principu Ottova cyklu, ale skutečný pracovní cyklus se liší. V první době pracovního cyklu se píst z horní úvratě pohybuje směrem do dolní a nasává do spalovací komory směs kapalného paliva se vzduchem. Tato směs se netvoří tak lehko jako například u plynných paliv. Na kvalitě zápalné směsi závisí účinnost tepelné přeměny, protože při špatném smíšení paliva se vzduchem dochází k nedokonalému spalování. Tím se snižuje množství získané energie, které je v palivu obsaženo. V druhé době cyklu se směs stlačí (teplota směsi dosáhne 350°C až 450°C), v následující třetí době je směs zažehnuta elektrickým výbojem a dochází k expanzi (teplota 2000°C až 2500°C). Tato doba je také jedinou pracovní dobou čtyřdobého motoru. Čtvrtou a poslední dobou cyklu je výfuk, při kterém zplodiny (teplota 800°C až 900°C) ,vzniklé při spalování, odchází ze spalovací komory výfukovým potrubím bez využití do okolního ovzduší. Jeden pracovní oběh se uskuteční během čtyř zdvihů pístu. Tento pracovní oběh nám zobrazuje pracovní diagram skutečného pracovního cyklu zážehového motoru [1];[5].

Tepelná bilance zážehového motoru je znázorněna na obrázku (Obr.3). Energie obsažená v palivu je $Q_p$ (100%) a $Q_e$ je teplo přeměněné na efektivní práci motoru, což u zážehového motoru činí 25% až 35%. Zbytek tepla jsou ztráty, ve kterých je zahrnuto: nedokonalé spalování $Q_{ns}$ (0% až 5%), ztráty chlazením $Q_{ch}$ (12% až 30%), ztráty sáláním $Q_s$ (0% až 5%), ztráty výfuk $Q_v$ (30% až 55a%), mechanické ztráty třením $Q_m$ (5% až 10%)[2].

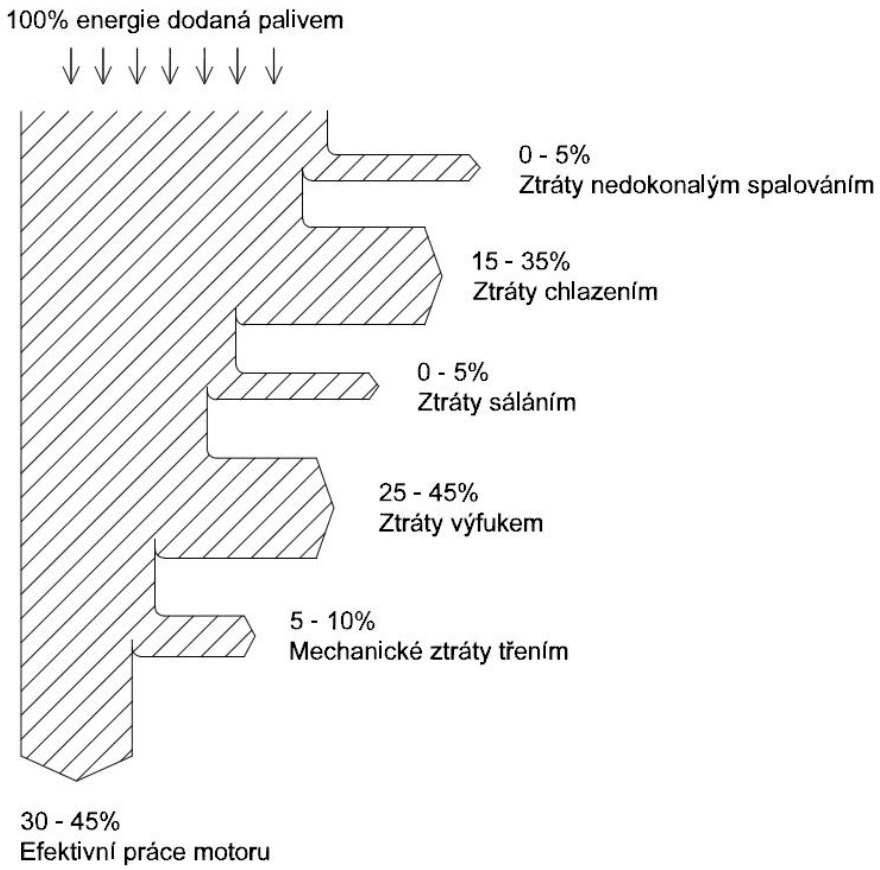



**Obr.3:** *Schéma energetické bilance zážehového motoru*

## 3.2 Naftové vznětové motory

Vznětový motor se od zážehového liší především způsobem tvorby zápalné směsi. U vznětového motoru je nasáván pouze vzduch (první doba - sání), který se následně stlačí (druhá doba - komprese), čímž dojde k zahřátí (teplota 600°C až 900°C). Do stlačené směsi se vstříkne palivo, které se vlivem teploty vznítí a dojde k expanzi (třetí doba - expanze). Proto musí být kompresní poměr dostatečně velký, aby stlačený vzduch dosáhl kompresní teploty vyšší než je teplota vznícení paliva. Následně se otevřou výfukové ventily a zplodiny o teplotě 600° až 700° se vypustí do ovzduší (čtvrtá doba - výfuk). Teoretický pracovní cyklus vznětového motoru popisuje smíšený Sabatův cyklus, ale i ten se od skutečného pracovního cyklu liší[1];[5].

Tepelná bilance vznětového motoru se od zážehového mírně liší. Díky použití smíšeného pracovní cyklu se zvýší množství přeměněné energie na efektivní práci motoru. To je vidět na schématu (Obr.4). U vznětového motoru je teplo efektivně využité na pohon nápravy $Q_e$ (30% až 45%). Ztráty nedokonalostí spalování $Q_{ns}$ (0% až 5%), sáláním $Q_s$ (0% až 5%) a mechanické ztráty $Q_m$ (5% až 10%) jsou stejné jak u zážehového. Liší se hodnoty ztrát výfukem $Q_v$ (25% až 45%) a chlazením (15% až 35%) [2].




**Obr.4:** *Schéma energetické bilance vznětového motoru*

## 3.3 Porovnání tepelných bilancí motorů

**Tab.1:** *Tabulka tepelných bilancí motorů*

| TEPELNÉ BILANCE | | Zážehový motor | Vznětový motor |
|---|---|---|---|
| Teplo dodané | | 100% | |
| Efektivně využitá energie | | 25÷35% | 30÷45% |
| Ztráty | chlazením | 12÷30% | 15÷35% |
| | výfukem | 30÷50% | 25÷45% |

Z hodnot uvedených v tabulce vyplývá, že vznětový motor efektivněji využije energii dodanou palivem, oproti zážehovému motoru. Při srovnání jednotlivých ztrát obou typů spalovacích motorů pak můžeme určit místo, které by mohlo být nejefektivnější pro aplikaci některé technologie pro využití odpadního tepla. U zážehového motoru jsou největší ztráty výfukovými plyny, proto by přicházelo v úvahu do výfukového vedení umístit rekuperační jednotku. Pro umístění jednotky do výfukového potrubí, je důležité vědět její vliv na chování výfukových plynů jí procházejících. V jednotce může vzniknout zpětný tlak, nebo by mohlo dojít k tak výraznému poklesu teploty, že by to neblaze ovlivnilo odchod plynů ze spalovacího prostoru [12]. Místo instalace jednotky se vybere podle teplot, při kterých pracuje. Je však důležité brát v úvahu, že ve výfukovém potrubí se nachází i katalyzátor, který pro svou funkci vyžaduje vyšší pracovní teploty. Proto je důležité rozhodnout, zda bude jednotka umístěna před, nebo za katalyzátorem. Oproti tomu, u vznětových motorů tvoří nezanedbatelnou část ztráty chlazením z důvodu vyšších pracovních teplot motoru, proto by bylo vhodné využít i toto odpadní teplo.

# 4. PŘEHLED MOŽNÝCH TECHNICKÝCH ŘEŠENÍ VYUŽÍVAJÍCÍCH ODPADNÍHO TEPLA SPALIN

V průmyslu jsou známé mnohé technologie, které jsou vhodné pro použití k rekuperaci odpadního tepla z výrobního procesu, nebo jako kogenerační jednotky při výrobě tepla a elektřiny. Často jsou používány k tomuto účelu tepelné motory (Stirlingův motor, Rankin-Clausiův cyklus atd.). Díky novým moderním materiálům se pro využití odpadního tepla v menších aplikacích, začínají objevovat i termoelektrické generátory využívající Seebeckova jevu[44];[45].

U spalovacích motorů se již používají zařízení využívající kinetickou energii výfukových plynů (turbodmychadla) pro zlepšení účinnosti motoru. V těchto plynech ale zůstává poměrně velké množství energie tepelné, která by se dala přeměnit na jiný druh energie. Jak udává [9] podle způsobu přeměny tepelné energie zařízení dělíme na:

1) <u>Termo – dynamické:</u>

   - Stirlingův motor
   - Rankin-Clausiův cyklus (parní nebo organický)

2) <u>Termo – elektrické:</u>

   - Seebeckův jev
   - Termofotovoltaika
   - Termoemissní měniče
   - Termotunneling

3) <u>Termo – chemické</u>

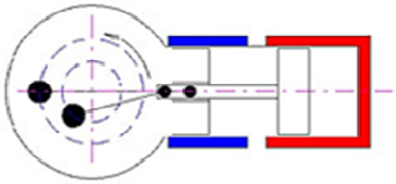
   - Palivové články
   - Autotermální reformování (výroba vodíku)
   - Pyrolýza
   - Zplynování

4) <u>Termo – akustické</u>

V automobilovém průmyslu, kde je kladen důraz na co nejmenší hmotnost z důvodu snížení spotřeby a tím i emisí, jsou vhodné jen některé tyto technologie. Dnes se vývoj zaobírá především dvěma řešení. Prvním je princip parní turbíny s použitím Rankin-Clausiova (RC) cyklu a druhým je termoelektrický generátor, využívající Seebeckova jevu.

## 4.1 Stirlingův motor

Stirlingův motor se jeví jako vhodný pro aplikaci na využití odpadního tepla díky své univerzálnosti a jednoduché konstrukci. Stirlingův motor řadíme mezi teplovzdušné motory. U tohoto motoru probíhá splováním externě mimo pracovní prostor motoru. Stirlingův motor pracuje na principu roztažnosti plynu. To znamená, že když se plyn ohřívá, roztahuje se, když se ochlazuje, svůj objem zmenšuje. Pracovní cyklus Stirlingova motoru se skládá z dvou izotermických a dvou izochorických dějů[9];[10].



**Obr.5:** *Schéma Stirlingova motoru[10]*

Konstrukce stirlingova motoru

Stirlingův motor se skládá z jednoho nebo dvou válců (podle toho o jakou modifikaci se jedná) a dvou pístů. Válec se na jedné straně ohřívá a na druhé chladí. První větší píst s vůlí je přeháněcí a slouží k přehánění vzduchu ve válci. Druhý menší píst, který je utěsněn, je pracovní. Oba písty jsou spojeny klikovým mechanizmem, který způsobuje zpoždění pístů a většinou je součástí setrvačníku. Podmínkou pro správný chod je, aby byl celý motor dokonale utěsněn proti úniku média z motoru[10].

Princip fungování stirlingova motoru

Přeháněcí píst přemístí vzduchu do ohřívané části válce, kde se ohřeje a zvětší svůj objem. Při zvětšení objemu dojde k zvýšení tlaku, ten působí na pracovní píst a vytlačuje ho do horní úvrati. Pracovní píst roztáčí setrvačník, tím koná práci, která může být využita. Klikový mechanizmus je uveden do pohybu a přeháněcí píst začíná plyn přesouvat do chlazené části válce, kde ochlazený plyn zmenšuje svůj objem a tlak. Pracovní píst je v dolní úvrati a přeháněcí píst začíná plyn přesouvat do ohřívané části válce. Celý cyklus se znovu opakuje[10].

Stirlingův motor má vekou výhodu v tom, že pro jeho pohon může být použito jakéhokoliv zdroje tepla. K tomu je jeho provoz velmi tichý a jeho teplotní operační rozsah provozu je stejný jako teplota výfukových plynů. Díky tomu má velký potenciál stát se zařízením pro kogeneraci energie u větších diesel agregátů, ale ne pro použití v automobilech, protože má nízký poměr výkonu vzhledem k jeho váze a velikosti. V neprospěch použití v automobilech dále hovoří nutnost lepšího chlazení, tedy větší chladič a větší množství pohybujících se částí [9];[10].

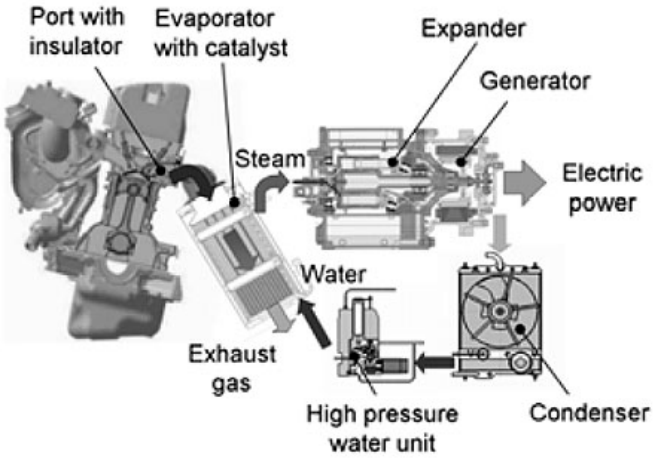
## 4.2 Rankin-Clausiův cyklus

RC cyklus je uzavřený cyklus, ve kterém je využíváno změn pracovní látky, většinou vody, která mění své skupenství. Organický Rankin-Clausiův cyklus (ORC) se liší pouze v tom, že je zde použita organická pracovní látka. Princip cyklu je takový, že stlačená kapalina se zahřeje na bod varu a dále se přehřívá do bodu vzniku syté páry, ta expanduje v expandéru (turbíně) na stav mokré páry. Expandér (Turbína) pak pohání generátor pro výrobu elektrické energie. V kondenzátoru se pára přemění zpět do kapalného skupenství a je čerpána zpět do ohřívacího zařízení (výparníku)[11];[46].

Nevýhodou těchto zařízení, je jejich požadavek na prostor a větší počet komponentů, což zvyšuje riziko poruchy. Dalším problémem je zvolit vhodnou pracovní tekutinu pro daný rozsah pracovních teplot. Na využití RC a ORC cyklu bylo zpracováno několik studii předními světovými automobilkami, jako jsou: Ford Motor Company (Ford), Honda Motor Company (Honda) a BMW.

### 4.2.1 Studie RC cyklu od Hondy

Honda v roce 2008 představila studii kogenerační jednotky fungující na bázi RC cyklu, která využívá odpadní teplo výfukových plynů a mění jí na elektrickou energii, která nabijí baterie. Uvedené výsledky testu probíhaly při konstantní rychlosti 100 km/h na motoru o objemu 2,0L s přímím vstřikováním v automobilu Honda Stream. Při použití RC cyklu byla tepelná účinnost motoru o 3,8% vyšší. Na dálničním okruhu generovala jednotka třikrát více energie než regenerativní brzdný systém. Objemová turbína je konstruována pro maximální výkon 32kW. Maximální tepelná účinnost celé jednotky je 13% při dodávaném výkonu 23kW[11].

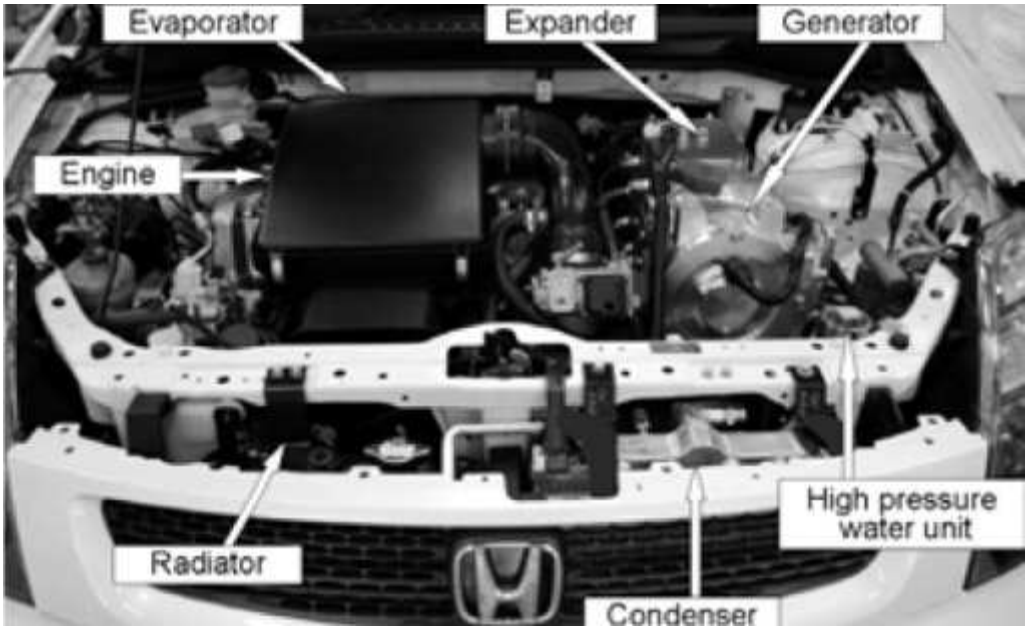



**Obr.6:** *Schéma zapojení komponent systému pro využití odpadního tepla od Hondy [11]*

Konstrukce:

Pro měření byl použit sériový motor, na který byla nainstalována modifikovaná hlava válce s izolovanými výfukovými kanály. Kogenerační jednotka se dále skládala z:

- Výparníku zabudovaný do katalyzátoru
- Vysokotlaká vodní pumpa (pracovní látka je voda)
- Expandéru (turbíny) / Generátoru
- Kondenzátoru




**Obr.7:** *Uspořádání v motoru automobilu Honda Stream[11]*

Vysokotlaká vodní pumpa tlačí vodu do výparníku, kde za pomocí tepla zplodin vznikne pára, která expanduje v objemové turbíně. Ta pohání generátor. Odtud směřuje pára do kondenzátoru v přední části auta, kde voda zkapalní. RC jednotka má automatický řídící sytém tvorby páry, který udržuje tepotu v rozmezí 400-500°C při tlaku 7-9MPa[11].

### 4.2.2 Studie ORC cyklu Ford Motor Company

V roce 2011 zveřejnila Ford Motor Company na výzkumné konferenci Directions in Engine-efficiency and Emissions (DEER) svou studii ORC pro využití odpadního tepla výfukových plynů. Tento systém využívá R245fa jako pracovní tekutinu. Předpokládá se, že by tento systém mohl dodávat dostatečný výkon pro kompletní napájení elektrického příslušenství vozidla Ford Escape 2,5 litru, při jízdě po dálnici a při městském provozu by měla být pokryta polovina nároků na el. energii. Tým Ford používá organické kapaliny, protože mají řadu výhod, včetně velmi nízkého bodu tuhnutí. Výparník byl skořepino-

trubicové konstrukce s trubkami, ve kterých procházely výfukové plyny. Počítalo se s vysokými tlaky v místech, kde se mění hmotnostní průtoky pracovní kapaliny v závislosti na množství dodávaného tepla. Tým Ford ale zjistil, že dochází ke vzniku velkých zpětných tlaků a velkému ochlazení výfukových plynů, což mělo za následek zvýšení spotřeby paliva[12],[13].

### 4.2.3 Studie RC cyklu BMW

BMW představila na světovém kongresu SAE International (Society of automative Engineers) 2009, analýzu dvou konfigurací RC cyklu, aplikovaných na termodynamické využití tepelného systému pro čtyřválcový spalovací motor. BMW na základě svých měření došlo k závěru, že odpadní teplo může poskytnout dalších 10% výkon při jízdě po dálnici, nebo ustálenou rychlostí mimo město. Základem je, aby pracovní kapalina, o vysokém tlaku, které je dodávané teplo o vysoké teplotě, generovala vysoko přehřátou páru, a převáděla ji na energii mechanickou. V předložené studii, tým BMW omezuje své hodnocení na dva základní systémy jednotlivých smyček[14]. Těmito smyčkami jsou:

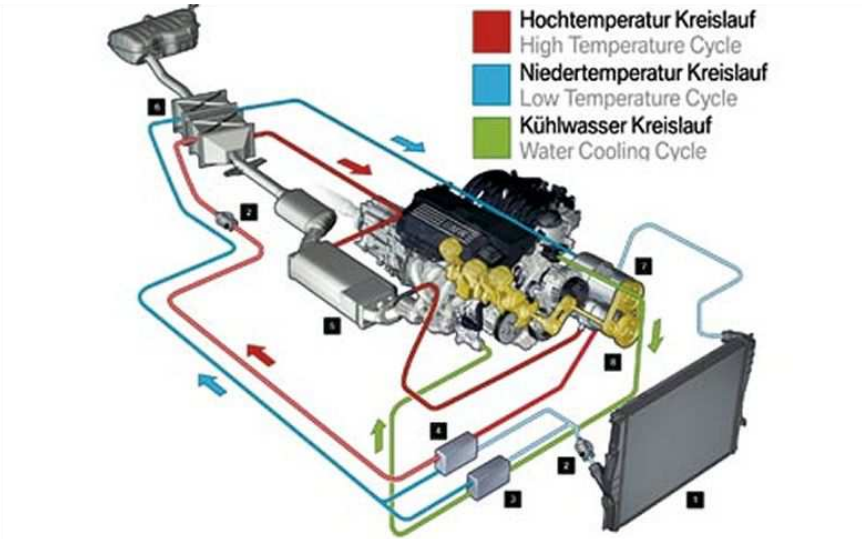
- Systém A používá jako zdroj tepla pouze výfukových plynů.
- Systém B používá výfukových plynů a chladicí kapaliny.

Jako pracovní látky byli uvažované kapaliny s vysokou výparnou entalpií. Takovou látkou je například voda (~ 2250 kJ/kg), následována je alkoholy (metanol ~ 1100 kJ/kg, Etanol ~ 820 kJ/kg). Na základě analýzy v rámci omezených provozních podmínek, BMW zjistilo, že voda má nejvyšší tepelnou účinnost při použití v systém A, zatímco etanol je vhodnější pracovní kapalina pro systém B (metanol zamítnut z důvodu zdravotních rizik). Konstrukce obou systémů se skládá z expandéru, čerpadla, chladiče a výměníků tepla. Na základě parametrické analýzy, BMW zjistilo, že systém B ukazuje vyšší potenciál pro použití a to v typických dálničních rychlostech (72-120 km/h) pro zvolený typ motoru (4válec). Na testovací lavici BMW došlo k závěru, že systém B může dodat další výkon v rozmezí 0,7-2 kW. BMW však upozorňuje, že tento systém je experimentální a výsledky se vztahují pouze na konkrétní použitý motor o konkrétních tlacích a teplotách[14].

## 4.3 Turbosteamer

Turbosteamer je dalším konceptem automobilky BMW, který využívá parní turbíny při získávání energie z odpadního tepla spalovacího motoru. Turbosteamer využívá kombinované výroby tepla a elektřiny v autech. Zpráva BMW [15], ze které čerpá následující text, uvádí, že použitím této sekundární jednotky spotřebuje čtyřválcový motor v laboratorních podmínkách až o 15 procent méně energie, zatímco vyrobí o 10 kilowattů vyšší výkon. Tato dodatečná energie je získaná výlučně z tepla výfukových plynů a chladicí vody. Z toho plynou výhody: méně emisí a spotřeby se zvýšenou dynamikou a výkonem.

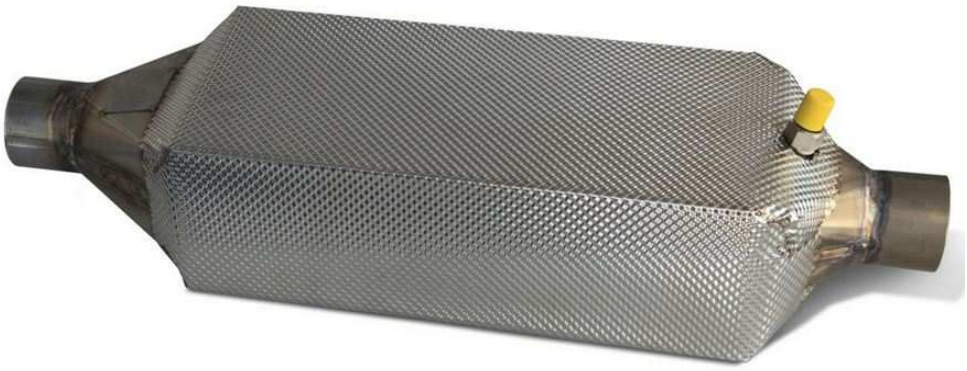
Turbosteamer je založen na dvou uzavřených okruzích. První a hlavní je vysokoteplotní okruhu, který využívá odpadního tepla z výfukových plynů. Teplo je získáno ze dvou výměníků tepla ve výfukovém potrubí v těsně blízkosti za motorem, přes které je čerpána tekutina při tlaku do 4 MPa a mění se v páru. I když je motor auta pouze mírně namáhán, tekutina je v tomto obvodu zahřívána až na teplotu 550°C. Horká pára proudí do expanzní turbíny, která je připojena na klikový hřídel a tím je roztáčen nejen silou pístu ale i energií získanou z turbíny. Během této práce se teplota páry sníží na 150 až 200°C. Tímto způsobem je možno využít až 80 % energie, která by jinak odešla výfukem[15].




**Obr.8:** *Zobrazení tepelných okruhů v Turbosteamer [39]*

Druhý obvod pracuje s nižšími teplotami. Získává teplo z chladicího systému automobilu. V tomto okruhu je použit jako pracovní látka etanol. Ten se zahřeje jak teplem z chladicího systému motoru, tak teplem z vysokoteplotního okruhu. Tímto způsobem se zajistí dostatek energie pro zahřátí etanolu průměrně na 100°C, pro použití v sekundárním expanzním zařízení, který také přispívá k zvýšení výkonu a snížení spotřeby. I když tato teplota dostatečná k použití druhé expanzní turbíny, stupeň účinnosti stále není uspokojivý. Z tohoto důvodu je instalovaná druhoá smyčku na konci výfukového výměníku tepla, díky tomu je dosaženo průměrné teploty 150°C. Druhá expanzní turbína převádí toto teplo do další

rotace působící na klikový hřídel. Nízkoteplotní okruh je uzavřen konvenčním otopným tělesem, které uvolní zbývající teplo z kondenzace etanolu do okolní atmosféry. Množství přidaného výkonu, které Turbosteamer poskytuje, může být až 10 kW a koncepce má největší účinnost při použití se spalovacím motorem[15].



**Obr.9:** Výfukový *tepelný výměník Turbosteameru [16]*

V dnešní podobě Turbosteamer prošel mnohými úpravami a byl podstatně zjednodušen z důvodu vhodnějšího použití v sériově vyráběných automobilech. Namísto dvou okruhů je tu okruh jediný, který získává teplo výhradně z výfukových plynů. Turbína pak pohání pouze generátor pro výrobu elektřiny. Použit byl princip impulzní turbíny, kde turbínu pohání přímo proud média dopadajícího na lopatky. Předpokládá se, že systém bude schopen vyrábět takové množství elektrické energie, které bude dostačovat pro pohon vozu při jízdě ustálenou rychlostí mimo město nebo na dálnici. Tím by mohlo být dosaženo o 10 procent nižší spotřeby při delších cestách[16].

# 5. TERMOELEKTRICKÉ GENERÁTORY

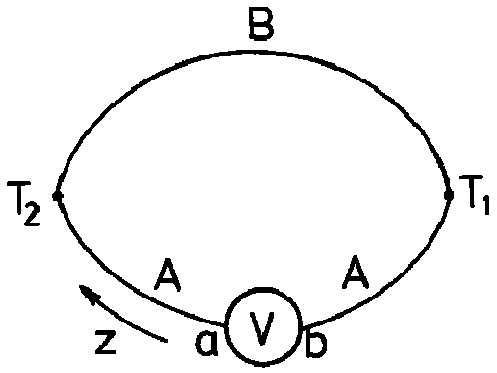
Termoelektrické generátory (TEG) jsou další nejčastěji zkoumanou technologií pro využití odpadního tepla. Funkce termoelektrických generátorů je založena na fyzikálním jevu známém jako Seebeckův jev. TEG využívají rozdíl teplot pro přímou přeměnu tepelné energie na elektrickou. Tento způsob výroby energie byl znám už na přelomu 19. a 20. století, ale do popředí se TEG dostaly až v posledních letech s nástupem moderních, kompozitních polovodičových materiálů, díky nimž se zvýšila termoelektrická účinnost, která je pro TEG zásadní[6];[19].

**Výhody termoelektrických generátorů**

Hlavní výhodou TEG je přímá přeměna tepelné energie na energii elektrickou bez nutnosti jiné energetické mezi přeměny. Tím se taky snižují nároky na údržbu, jelikož je to pevný celek bez pohyblivých mechanických částí. Další výhodou je, že zdrojem energie může být jakýkoliv tepelný zdroj vytvářející dostatečný tepelný tok. Tyto tepelné zdroje mohou být například kamna, hořáky, pece, nebo stroje produkující teplo jako vedlejší produkt. Takovým strojem je například pohon automobilu. U toho je možné využít odpadní teplo spalovacího procesu, které by jinak bez využití odešlo do okolní atmosféry. Tepelná energie je k dispozici v mnoha různých místech, kde jiné zdroje nemusí být k dispozici. TEG jsou velmi robustní, což je ideální pro úkoly v náročných podmínkách, jako jsou automobily, spalovny, a kosmická sondy[18];[27].

## 5.1 Princip termoelektrické přeměny

Termoelektrická přeměna spočívá v termoelektrických jevech. Základním jevem pro termoelektrickou přeměnu je Seebeckův jev, který popisuj vznik termoelektrického napětí v obvodu složeného ze dvou vodičů při teplotním rozdílu na jejich spojích. Jednoduché zařízení ze dvou různých vodičů spojených na koncích se nazývá termoelektrický článek. Jeho účinnost závisí na vlastnostech materiálů, z nichž jsou vodiče vyrobeny, a na rozdílu teplot mezi teplým a studeným spojem [21].




**Obr.10:** *Schéma Seebeckova jevu [42]*

Podle [17] a [21] jsou dalšími základními termoelektrickými jevy:

- Peltierův jev – je inverzní jev Seebeckův a popisuje vznik nebo zánik tepla na spojích dvou různých vodičů v případě, že jimi prochází elektrický proud
- Thomsonův jev – popisuj vznik anebo zánik tepla v objemu vodiče s teplotním gradientem při průtoku elektrického proudu

Proud vzniklý v článku je způsoben rozdílem elektrického potenciálu ve spojích vyvolaným tepelnými rozdíly mezi materiály. Při rozdílných elektrických potenciálech naměříme na otevřeném okruhu napětí. Pokud okruh uzavřeme, napětí vzniklé ve vodiči nám dá do pohybu elektrony, které jsou nosičem náboje v případě, že jsme za materiál vodiče zvolili například měď. Měď je základní prvek, který má jeden valenční elektron a snadno ho předává. Díky tomu je dobrým elektrickým vodičem a při rozdílu elektrických potenciálu se elektrony pohybují směrem z místa o vyšší teplotě do míst o teplotě nižší[21];[30].

Účinnost takového článku pak závisí na druhu použitého materiálu a jeho vlastnostech, které jsou dány koeficientem termoelektrické účinnosti:

$$ZT = \left(\frac{\alpha^2 \cdot \sigma}{\lambda}\right) \cdot T \quad [-]$$

Hodnota ZT závisí na Seebeckově koeficientu (α), který je specifický pro každý materiál, na elektrické vodivosti (σ), tepelné vodivosti (λ) materiálu a teplotě (T). Koeficient termoelektrické účinnosti ZT je bezrozměrná veličina a u používaných materiálů je přibližně 1, což je počáteční hranice pro použití, z hlediska ekonomické návratnosti. Z toho důvodu je zapotřebí najít materiál s vysokou elektrickou vodivostí a co nejmenší tepelnou vodivostí, to je však problém, jelikož všechny dobře elektricky vodivé prvky jsou také dobrými tepelnými vodiči. Z tohoto důvodu se začali používat polovodiče. Jenže ty sami o sobě tvoří pevnou krystalickou strukturu, protože sdílené elektrony stále obíhají na oběžných drahách přilehlých jader a udržují strukturu stabilní mříže, materiál tak není příliš vodivý[18],[21],[30].

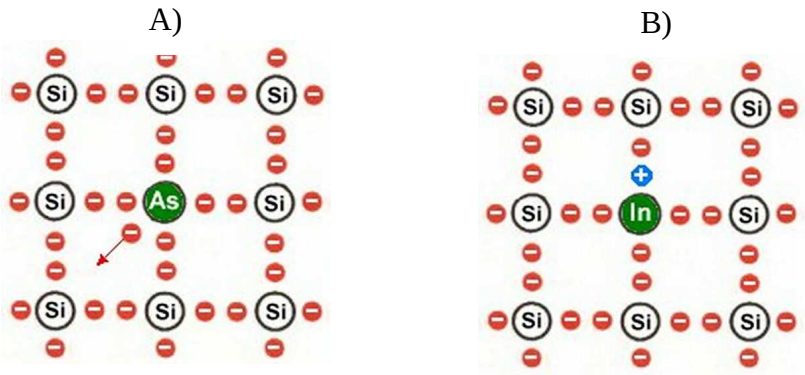
Pro zvýšení vodivosti polovodičů je potřeba navýšit počet valenčních elektronů respektive kladných děr. Toho dosáhneme příměsí jiného prvku, tím vznikne tzv. nečistota. Takto vzniknutým polovodičům říkáme nevlastní polovodiče [40].

**Nevlastní polovodiče typu N**

U nevlastního polovodiče typu N (negativní vodivost) jsou majoritními nositeli náboje elektrony. Vznik takového polovodiče, můžeme popsat například na křemíku. Čistý křemík je čtyřmocný prvek a tvoří pevnou krystalickou mříž. Nahrazením (dopováním) jednoho atomu křemíku v mřížce prvkem pětivazným (donor), nám v krystalické mřížce začne přebývat jeden valenční elektron, protože na vazbě se podílí pouze 4 valenční elektrony. Takto vznikne negativní vodivost typu N [40].

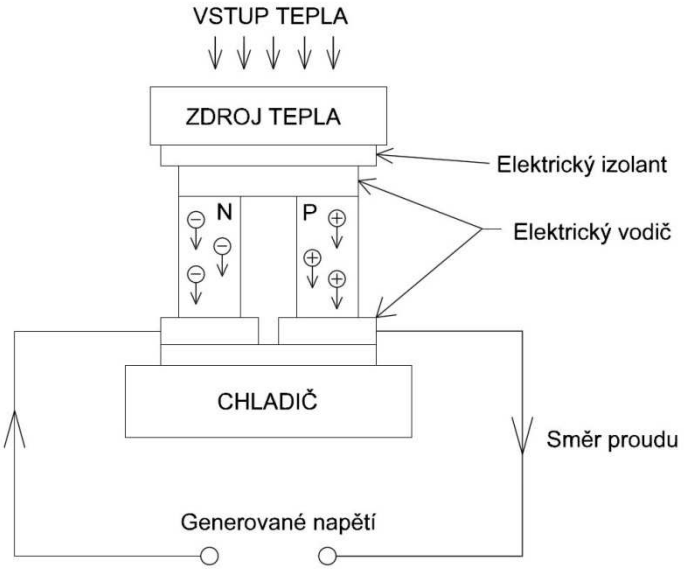
**Nevlastní polovodiče typu P**

U nevlastních polovodičů typu P jsou majoritními nosiči náboje díry, tudíž v nich vzniká pozitivní vodivost. Pozitivní vodivost nastává nadbytkem kladných děr v krystalické mřížce prvku. Tohoto nadbytku dosáhneme, pokud čtyřmocný prvek dopujeme prvkem trojmocným (akceptor), vazby se zúčastní pouze tři valenční elektrony a jeden bude scházet. V případě připojení nevlastního polovodiče typu N na zdroj napětí, budou volné elektrony přeskakovat do děr směrem od záporného pólu, ke kladnému pólu zdroje a u děr to bude naopak[40].




**Obr.11:** *A) vznik nevlastního polovodič N[40]*
*B) vznik nevlastního polovodiče P[40]*

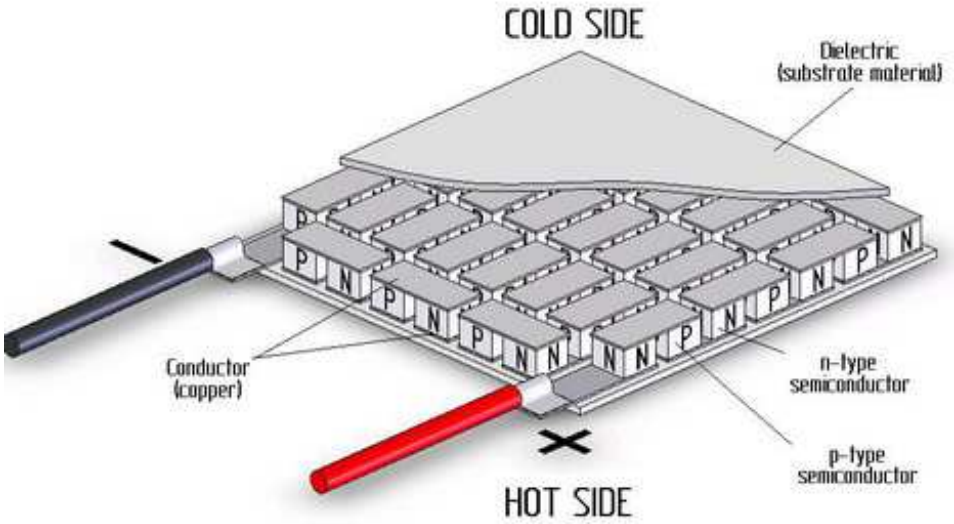
Při použití obou materiálů typu N a P v jednom zařízení pro výrobu elektřiny se jejich koeficienty α sčítají a dochází k maximální optimalizaci Seebeckova účinku[19].




**Obr.12:** *Schéma průchodu proudu a elektronů při použití polovodičů P a N*

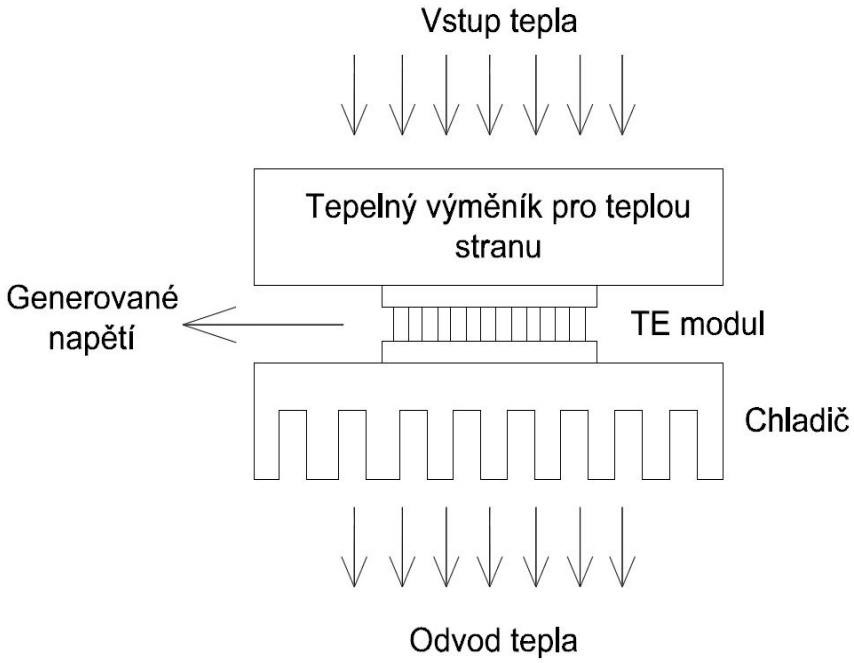
## 5.2 Konstrukce termoelektrického generátoru

Vlastní konstrukce TEG se skládá z dvou výměníků tepla. Jednoho pro teplou stranu a druhého pro chladnou stranu. Mezi těmito výměníky jsou vhodně konstrukčně uspořádané termoelektrické moduly. Tyto termoelektrické moduly jsou základním stavebním kamenem celého TEG. Základem jsou střídavě uspořádané P a N polovodičové termoelektrické dvojce spojené vodivým můstkem. Více těchto sériově zapojených termoelektrických dvojic dá pak za vznik termoelektrickým modulům. TEG jsou konstruované pro různé teplotní rozsahy, ve kterých fungují, proto je důležité správné materiálové složení termoelektrických dvojic (viz termoelektrické materiály), ale také počet termočlánků v modulu, aby se zajistilo, že co nejvíce dostupného tepla projde aktivní částí termoelektrického modulu[19][20].




**Obr.13:** *Termoelektrický modul [43]*

Termoelektrické moduly můžou být konstruované jako monolitické pokud to dovolí materiály polovodičů. To závisí na jejich tepelné roztažnosti a to jak jsou materiály chemicky sloučitelné. Monolitické moduly se ale vůbec nepoužívají. V drtivé většině bývají konstruované tak že jsou složeny z jednotlivých sloupků termoelektrických dvojic oddělených elektrickým izolantem (vzduch) a na koncích spojené kovovým vodivým můstkem. Toto spojení můstkem je taky problematické, jelikož na spoji s můstkem vzniká přechodový odpor, čím se podstatně snižuje výkon. Můstky se většinou pájí. Mohou se i lepit tam kde se materiál s pájkou vůbec nespojí, nebo pájka difunduje do materiálu a mění jeho vlastnosti. Články jsou pak vloženy mezi dvě elektricky nevodivé desky, většinou keramické, pro zlepšení mechanických vlastností modul [19];[20].




**Obr.14:** *Schematické zobrazení TEG*

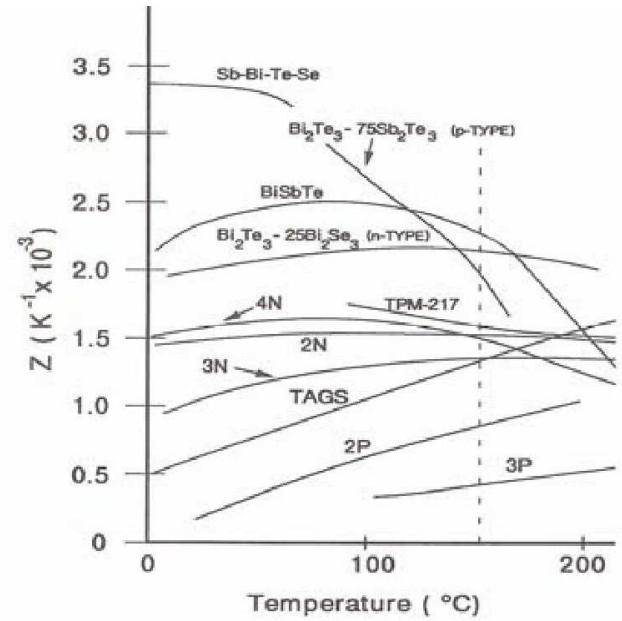
## 5.3 Termoelektrické materiály

Termoelektrické materiály jsou neustále se vyvíjející odvětví, ve kterém v posledních desetiletích došlo k mnohým poznatkům a k objevům nových materiálů vhodných pro použití v TEG. Na volbě materiálu je závislá nejdůležitější vlastnost TEG a tou je celková účinnost.

Pro materiál vhodný k použití jako termoelektrický jsou zásadní vlastnosti, kterými jsou vysoký Seebeckův koeficient α, nízká tepelná vodivost λ a vysoká elektrická vodivost σ. Nízká tepelná vodivost je důležitá pro udržení tepla v oblasti tepelného přechodu a vysoká elektrická vodivost minimalizuje ztráty odporem. Jinak řečeno vratné termoelektrické účinky by měly převažovat nad nevratnými tepelnými. Tyto vlastnosti materiálů jsou obsažený ve vztahu (2)

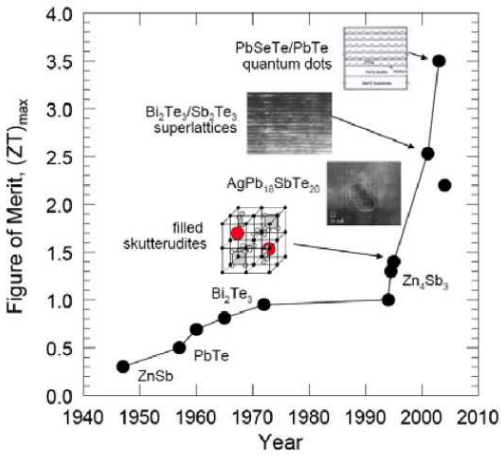
$$Z = \frac{\alpha^2 \cdot \sigma}{\lambda} \quad [K^{-1}]$$

jehož výslednou hodnotou je koeficient termoelektrické účinnosti *Z*. Ten se v závislosti na teplotě mění jak je vidět na Graf.5. Ve většině případů se zavádí bezrozměrný koeficient ZT, který je vyjádřený při dané absolutní teplotě. Tento koeficient se nazývá koeficient termoelektrické účinnosti a nejdůležitější hodnota pro porovnání účinnosti termoelektrických materiálů v dnešní době.[21];[22]




**Graf. 5:** *Závislost koeficientu termoelektrické účinnosti materiálu na teplotě.[22]*

V posledních desetiletí u termoelektrických materiálů došlo k značnému zvýšení koeficientu termoelektrické účinnosti jak je vidět na Graf.6 [24].

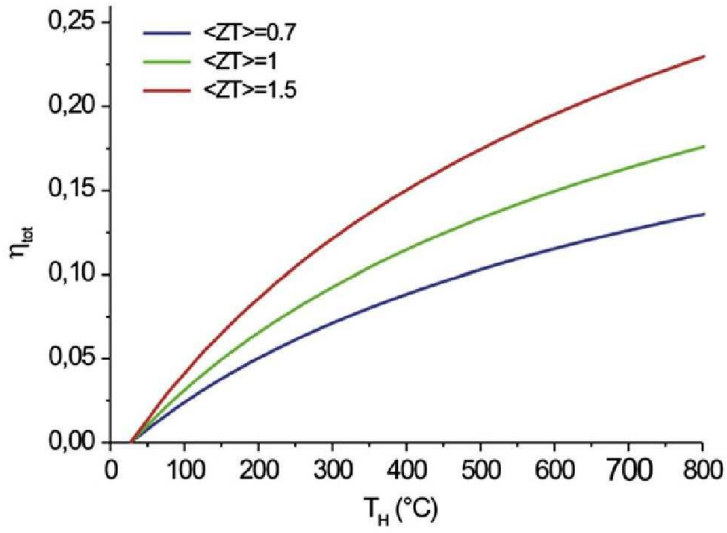



**Graf.6:** *Vývoj koeficientu termoelektrické účinnosti v letech [24]*

Na termoelektrickém koeficientu účinnosti a na teplotě závisí účinnost termoelektrické přeměny jak je vidět na Graf.7. Účinnost TEG jako tepelného stroje je dána poměrem energie dodané do stroje, ku teplu absorbovaném na teplém spoji a maximální účinnost TEG je dána vztahem:

$$\eta = \frac{T_h - T_c}{T_h} \cdot \frac{\sqrt{1+ZT}-1}{\sqrt{1+ZT}+\frac{T_c}{T_h}}$$

Účinnost a teplotní rozsah, ve kterém bude generátor pracovat, jsou důležité pro návrh TEG, protože různé termoelektrické materiály pracují v různých teplotních intervalech provozu, ve kterém poskytují jejich optimální výkon[25],[26].




**Graf.7:** *Účinnost generátoru v závislosti na vstupní teplotě [26]*

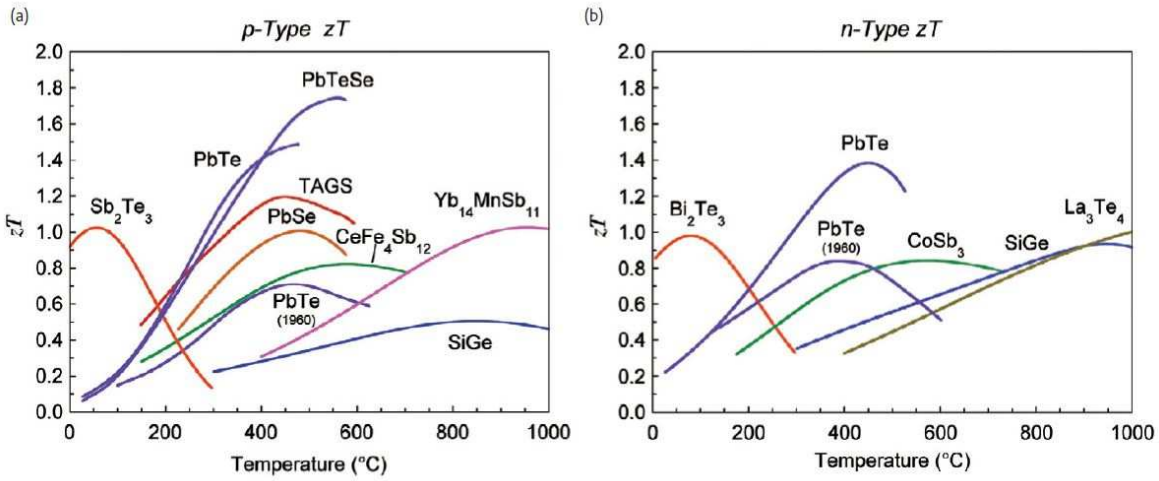
Při shrnutí výše uvedených poznatků se nám nabízí jako nejlepší termoelektrické materiály založené na polovodičových slitinách s odpovídajícím Seebackovým koeficientem α, přijatelným odporem a nízkou tepelnou vodivostí. Při takto optimalizovaných vlastnostech může být u polovodičových slitiny dosáhnuto vysokého koeficientu ZT. Tyto polovodičové materiály jsou hlavně telurid bismutitý, slitiny teluridu olovnatého a slitiny křemíku s germaniem [25].

- Slitiny na základě bismutu v kombinacích s antimonem, selenem, nebo telurem jsou materiály vhodné pro aplikaci v nižších teplotách a mohou být použity na teploty až kolem 450K.

- Pro střední teploty až kolem 850K jsou materiálů na bázi slitin olova.

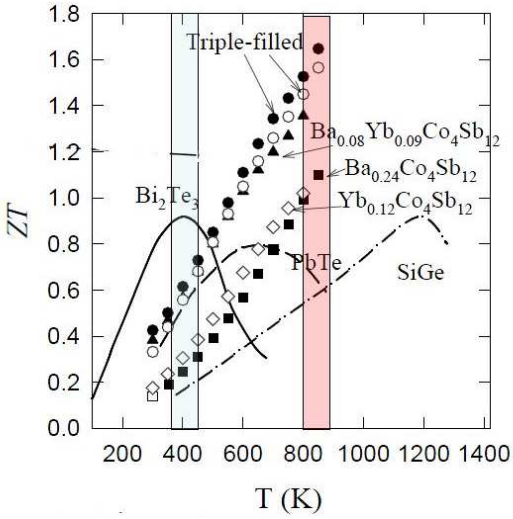
- Pro vysoké teploty jsou vhodné materiály zhotovené ze slitin křemíku a germania, ty mohou operovat při teplotách až 1300K.

Nejdéle známým a používaným materiálem pro TEG je dnes telurid bismutitý ten je však pro aplikaci v automobilech nepříliš vhodný z důvodu vyšších teplot spalin při kterých nedosahuje potřebných hodnot výkonu (Graf.8). Proto jsou hledány nové materiály, které jsou založeny na použití kompozitních materiálů, organických materiálů a různé druhy nanostruktur s kvantovými efekty.[23]




**Graf.8:** *Charakteristika materiálů pro TEG [27]*

Z důvodu potřeby vyšší účinnosti termoelektrických materiálů, byly vyvinuty materiály na bázi slitin křemíku s germaniem rozšířené o tzv. „phonon glass electronic crystals“ tento materiál má pak tepelnou vodivost jako sklo ale elektrickou vodivost jako krystal. Podobný princip využívají materiály se skutteruditovou strukturou. Tyto materiály díky své komplexní struktuře mohou mít do své krystalické mřížky vložené větší těžší atomy a tím snižují prostup tepla mřížkou při zachování elektrické vodivosti. Právě na skutterudity se nyní nejvíce spoléhá v automobilových TEG díky vysokému ZT (přibližně ZT =1,2) při vyšších teplotách. V budoucnu se předpokládá, že by se dalo, u těchto materiálů dosáhnou hodnot ZT =1,6 [21],[25],[28],[29].



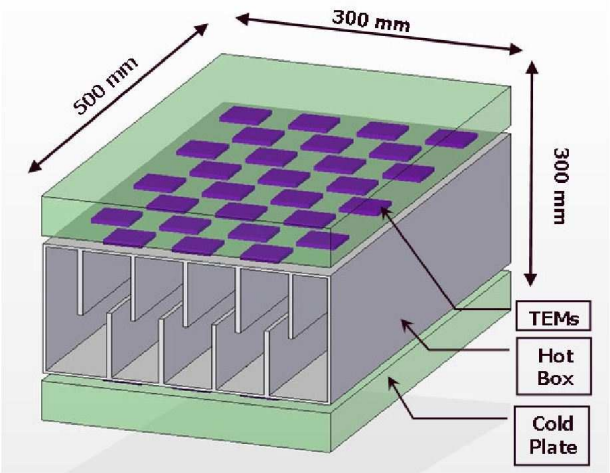

**Graf.9:** *Koeficient ZT skutteruditních materiálů v závislosti na rozsahu teplot [27]*

## 5.4 Aplikace termoelektrických generátorů

Termoelektrické generátory byly doposud používány většinou jako zdroj elektrické energie na odlehlých místech, kde nebyla jiná možnost získání energie. Tyto generátory byly například aplikovány jako zdroje energie vesmírných družic (NASA radioizotopový generátor) nebo jako zdroj energie v místech kde není dostupná elektrická síť, z toho důvodu se nebrala v potaz ve velkém měřítku cena takové aplikace. Pro aplikaci termoelektrického generátoru v automobilu je však třeba, aby poměr nákladů na výrobu a dodávaného výkonu byli v takovém poměru, aby se výroba vyplatila. Tohoto se podaří, dosáhnou, díky vývoji nových účinných a levných materiálů. První termoelektrický generátor byl navržen již v roce 196, ale do posut nebyl žádný uveden do komerčního použití u sériově vyráběných automobilů[19];[27];[30].

### 5.4.1 TEG University Karsruhe

Jedním z prvních automobilových TEG byl předveden na univerzitě Karsruhe v Německu roku 1988. Zařízení využívalo odpadního tepla výfukových plynů automobilu Porsche 944. Jako termoelektrické materiály byly použity FeSi2 s hliníkovým pozitivním dopingem a kobaltem pro negativní doping členů termoelektrické dvojce. Pro konstrukci bylo použito 90 termoelektrických článků. Maximální výstupní výkon, který mohl být generován z jednoho termočlánku, byl 1Watt při práci na rozdílu teplot 600 °C. Horká strana byla vyrobena ze slitiny Hastelloy ® X. Pro výměník na studené straně generátoru byl použit hliník, který udržoval studenou stranu termočlánku na teplotě 95°C při použití chladicí kapaliny motoru. Volné prostory byly izolovány pomocí keramických destiček. Celkové rozměry generátoru byly 500 mm x 300 mm x 300 mm. Při plném výkonu motoru Porsche 944 byl maximální výkon 58 W při přibližném teplotním rozdílu 490°C [30].



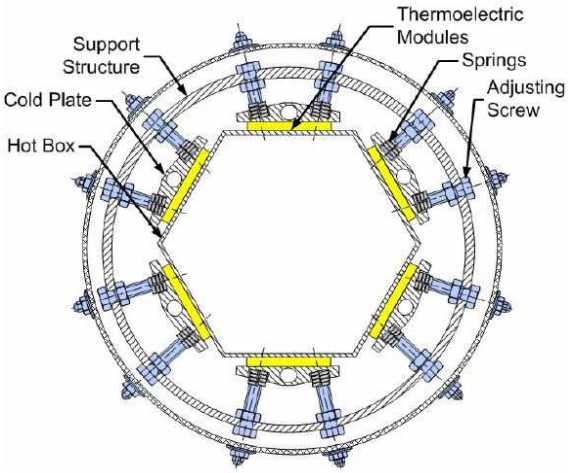

**Obr.15:** *Schematické zobrazení konstrukce TEG University Karsruhe[30]*

**Tab.2:** *Parametry TEG University Karsruhe*

| | |
|---|---|
| **TEPELNÝ VÝMĚNÍK** | |
| Materiál | Hastelloy ® X |
| Tepelná vodivost | - |
| Pracovní kapalina | výfukové plyny |
| Vstupní teplota | 600°C |
| Výstupní teplota | - |
| **CHLADIČ** | |
| Materiál | hliník |
| Tepelná vodivost | 204 W/m.K |
| Pracovní kapalina | voda |
| Vstupní teplota | 95°C |
| Výstupní teplota | - |
| **TESTOVACÍ MOTOR** | Porsche 944 |
| **MAXIMÁLNÍ VÝKON** | 58W |
| **Stav motoru při maximálním generovaném výkonu TEG** | - |
| | - |
| **Celková účinnost při maximálním výkonu TEG** | - |
| **Účinnost termoelektrické přeměny** | - |
| **Teplotní rozdíl při maximálním výkonu** | 490°C |

## 5.4.2 TEG Hi-Z Inc.

Firma Hi-Z Inc. představila v roce 1992 termoelektrický generátor pro vznětová vozidla. Generátor byl sestaven ze 72 modulů HZ-13 tohoto výrobce. Každý z těchto modulů obsahoval 49 článků z materiálu $Bi_2Te_3$. Modul měl velikosti 5,3 $cm^2$. Na horké straně byla teplota 230°C a na straně studené 30 °C [30].




**Obr.16:** *Konstrukce TEG firmy Hi-Z[30]*

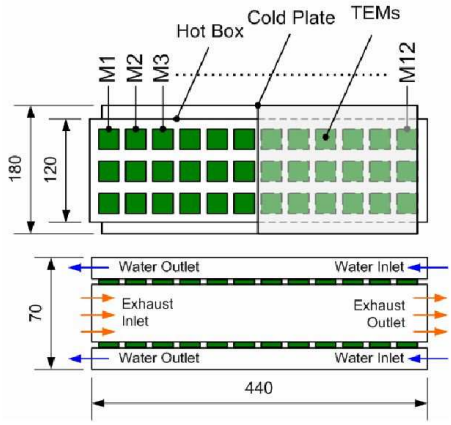
Celková rozměry TEG byly: délka 48.26 cm, průměrem 22.86cm a hmotnost 13,6kg. Tepelný výměník byl vyroben ze svařovaných plochých ocelových desek, které tvořily šestiúhelník. Na studené straně byl použit hliníkový chladič. Generátor byl navržen pro 1 kW elektrické energie, ale když byly zkušební testy provedeny na motoru 14 L Cummins NTC 325, generátor produkoval pouze 400 W [30].

**Tab.3:** *Parametry TEG společnosti Hi-Z*

| **TEPELNÝ VÝMĚNÍK** | |
|---|---|
| Materiál | uhlíková ocel |
| Tepelná vodivost | 50 W/m.K |
| Pracovní kapalina | výfukové plyny |
| Vstupní teplota | - |
| Výstupní teplota | - |
| **CHLADIČ** | |
| Materiál | hliník |
| Tepelná vodivost | 204 W/m.K |
| Pracovní kapalina | voda |
| Vstupní teplota | - |
| Výstupní teplota | - |
| **TESTOVACÍ MOTOR** | Commins 14L |
| **MAXIMÁLNÍ VÝKON** | 1068 W |
| **Stav motoru při maximálním generovaném výkonu TEG** | 1700 ot/min |
| | 300 koní |
| **Celková účinnost při maximálním výkonu TEG** | 1,30% |
| **Účinnost termoelektrické přeměny** | 4,50% |
| **Teplotní rozdíl při maximálním výkonu** | 250°C |

### 5.4.3 Nissan Motors Inc.

V roce 1998 Nissan Motors zveřejnil výsledky experimentálního testování TEG založený na SiGe. Generátor obsahoval 72 SiGe modulů, každý modul vyráběl 1,2 W při teplotním rozdílu 563 K mezi teplou a studenou stranou modulu. Celkové rozměry generátoru jsou 440 × 180 × 70 $mm^3$ a celková hmotnost je 14,5 kg. Moduly byly instalovány mezi tepelný výměník z SUS304 slitiny a dvěma vodou chlazenými plášti vyrobených z hliníku. Vnitřní skořepina má obdélníkový průřez a má dvě hladké strany, s nimiž teplá strana modulu přichází do styku. Pro přenos co největšího tepla jsou zde žebra. Moduly byly uspořádány do dvanácti bloků, každý blok obsahoval 3 moduly vzdálené od sebe 10 mm, tedy plocha skořepiny tepelného výměníku byla obsazená moduly pouze z 55%. Měření probíhalo při rychlosti odpovídající 60km/h u vozidla s benzínovým motorem a obsahem 3L [30].




**Obr.17:** *Schéma TEG Nissan Mototrs [30]*

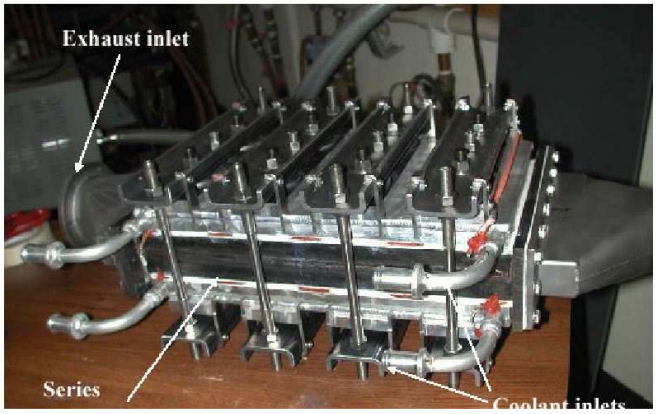
**Tab.4:** *Parametry TEG společnosti Nissan Motors*

| | |
|---|---|
| **TEPELNÝ VÝMĚNÍK** | |
| Materiál | SUS304 |
| Tepelná vodivost | 21,5 W/m.K |
| Pracovní kapalina | výfukové plyny |
| Vstupní teplota | 592°C |
| Výstupní teplota | 527°C |
| **CHLADIČ** | |
| Materiál | hliník |
| Tepelná vodivost | 204 W/m.K |
| Pracovní kapalina | voda |
| Vstupní teplota | 35°C |
| Výstupní teplota | 39,5°C |
| **TESTOVACÍ MOTOR** | 3,0L Benzínový |
| **MAXIMÁLNÍ VÝKON** | 35,6 W |
| **Stav motoru při maximálním generovaném výkonu TEG** | 60km/h |
| | Stoupání |
| **Celková účinnost při maximálním výkonu TEG** | 0,10% |
| **Účinnost termoelektrické přeměny** | 1 - 2% |
| **Teplotní rozdíl při maximálním výkonu** | 123°C |

### 5.4.4 TEG Clarkson University

V roce 2004 projekt tvořený univerzitou v Clraksonu a společností Delphi Systems, kteří byli financováni: NYSERDA (New York State Energy Research and Development Authority) a Ministerstvem energetiky USA (DOE USA), oznámily výsledky experimentu. Ten zahrnoval vytvoření 300 W TEG pro montáž na podvozek automobilu GM Siera. Pro konstrukci bylo použito celkem 16 termoelektrických modulů Hz-20. Osm modulů bylo

namontováno na každé straně tepelného výměníku z uhlíkové oceli a všechny moduly byly elektricky sériově a tepelně paralelně zapojeny. HZ-20 $Bi_2Te_3$ modul vytváří minimálně 19 W, při teplotním rozdílu 200°C. Jako chladič byly použity dva hliníkové pláště chlazené vodou. Celkové rozměry generátoru jsou 330 × 273 × 216 mm s hmotností 39.1 kg [30].




**Obr.18:** *TEG navržený na univerzitě v Clarkson [30]*

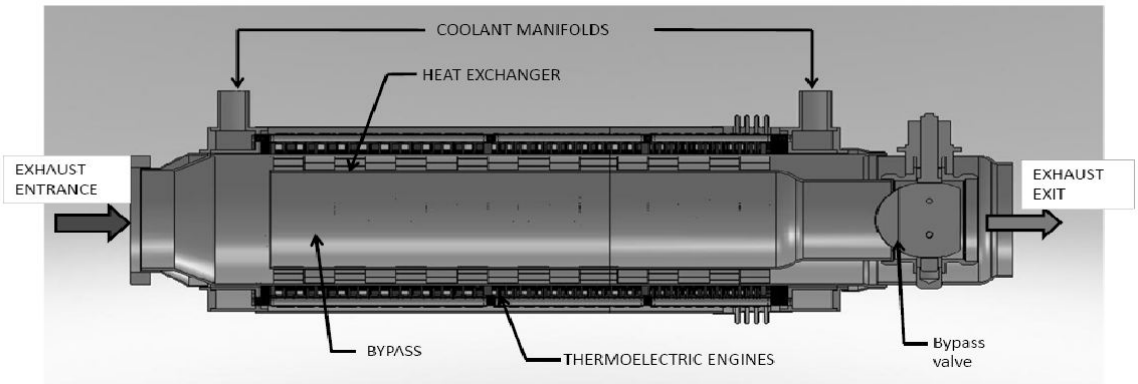
Testování TEG bylo provedeno na 270 koňovým V8 benzínovém motoru pickapu GM Sierra. Silniční testování bylo provedeno při rychlostech 48.28 km/h, 80,47 km/h a 112.65km/h. Nejvyššího výkon a celkové účinnosti TEG bylo dosaženo při rychlosti vozidla 112.65 km/h [30].

**Tab.5:** *Parametry TEG navržený na univerzitě v Clarkson*

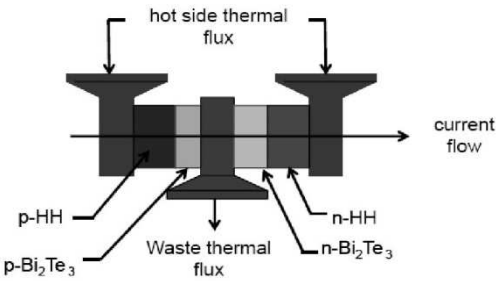
| | |
|---|---|
| **TEPELNÝ VÝMĚNÍK** | |
| Materiál | uhlíková ocel |
| Tepelná vodivost | 50 W/m.K |
| Pracovní kapalina | výfukové plyny |
| Vstupní teplota | 530,8°C |
| Výstupní teplota | 421°C |
| **CHLADIČ** | |
| Materiál | hliník |
| Tepelná vodivost | 204 W/m.K |
| Pracovní kapalina | voda |
| Vstupní teplota | 8,7°C |
| Výstupní teplota | 93,9°C |
| **TESTOVACÍ MOTOR** | - |
| **MAXIMÁLNÍ VÝKON** | 255,1W |
| **Stav motoru při maximálním generovaném výkonu TEG** | 112,65 km/h |
| | Stoupání 7,2% |
| **Celková účinnost při maximálním výkonu TEG** | 1,66% |
| **Účinnost termoelektrické přeměny** | 2,8 - 2,9% |
| **Teplotní rozdíl při maximálním výkonu** | 173,72°C |

### 5.4.5 BMW

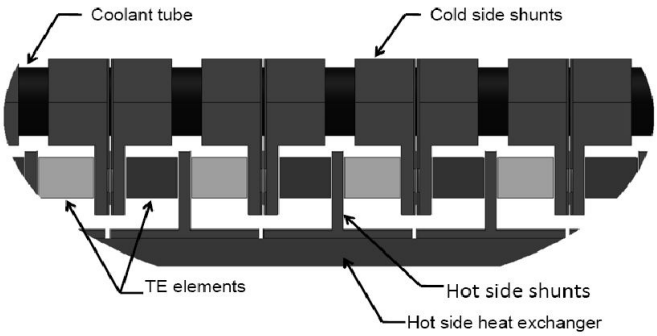
BMW je jedna z automobilek, které se významně podílí na vývoji termoelektrických generátorů v automobilech. Již v roce 2008 představila první TEG v rámci svého programu Efficientdynamics, který byl zabudován ve výfukovém potrubí. Skládal se z 30 termoelektrických modulů, z nichž 12 bylo vysokoteplotních. Nejvyšší výkon byl dosahován při vysokých rychlostech (130 km/h). Tento výkon činil 200W. Nyní se BMW podílí pod záštitou DOE USA na projektu vývoje termoelektrického generátoru spolu s dalšími firmami (Amerigon, ZT Plus, Faurecia, Ford). TEG má speciální konstrukci, je tvořen 500 termočlánky uspořádaných do stagu. Těchto 500 článku bylo rozděleno do tří teplotních oblastí TEG (vysokoteplotní oblast, oblast středních teplot a nízkoteplotní oblast) Jako materiál byly použity $Bi_2Te_3$ a Half Hausler slitiny. Konstrukce TEG je složena ze dvou válců vložených do sebe. Prostor mezi nimi je vyplněn žebry z nerezové oceli oplátované mědí, tyto žebra zajišťují přívod tepla, na teplou stanu článků. Vnitřní válec slouží jako baypas proti vzniku zpětného tlaku zplodin a přehřívání. Termočlánky jsou na tepleném výměníku zafixovány měděnými objímkami, které jsou elektricky odizolované od tepelného výměníku. Chlazení článků je zajištěno hliníkovými trubicemi s cirkulující chladicí kapalinou. Celková váha TEG je 10,5 kg. Na měřící stolici bylo dosaženo, při teplotě teplé strany 600°C a teplotě studené strany 20°C, výkonu 608W. Při měření generátoru, instalovaného na testovacích vozidlech BMW X6 a FORD Lincoln MKT, byl na obou vozidlech za provozu naměřen výkon 450W [31],[32].



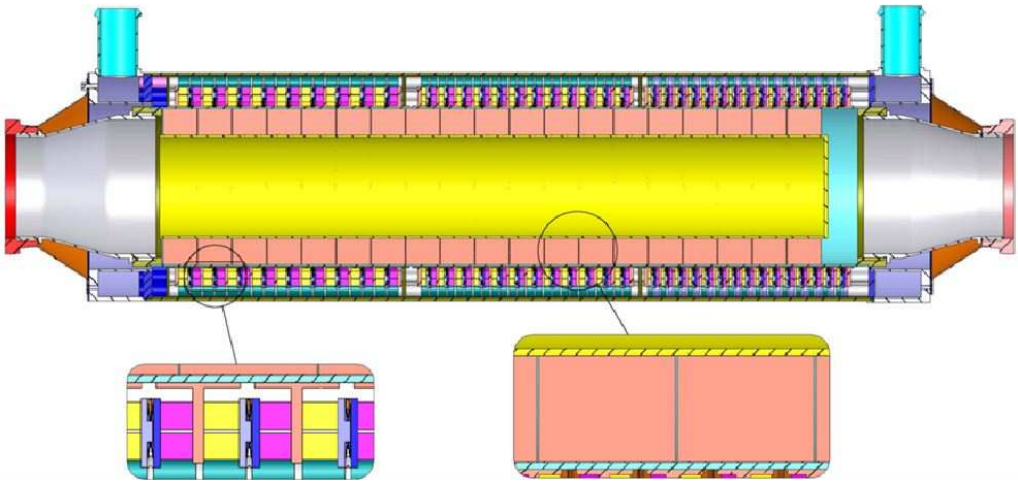

**Obr.19:** *Konstrukce TEG použitého v BMW X6[31]*




**Obr.20:** *TE článek uspořádaná do stagu[41]*




**Obr.21:** *Uložení TE článků [41]*



**Obr.22:** *Konstrukce TEG BMW a uložení termoelektrických článků mezi tepelným výměníkem a chladícími trubkami [32]*

**Tab.6:** *Parametry TEG instalovaného v BMW X6*

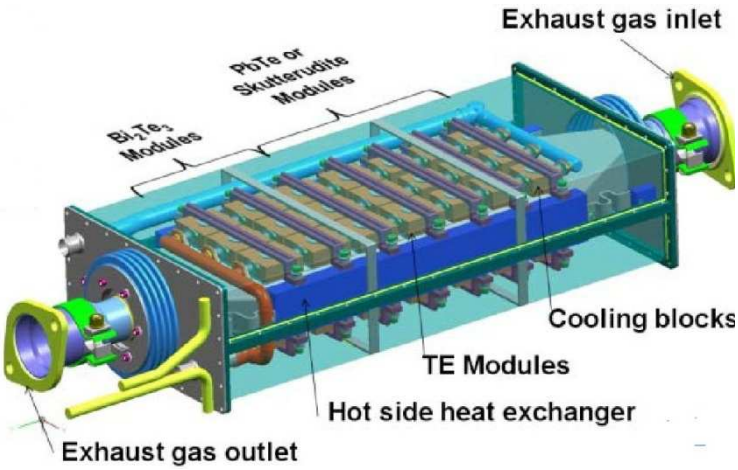
| | |
|---|---|
| **TEPELNÝ VÝMĚNÍK** | |
| Materiál | nerezová ocel |
| Tepelná vodivost | - |
| Pracovní kapalina | výfukové plyny |
| Vstupní teplota | 600°C |
| Výstupní teplota | - |
| **CHLADIČ** | |
| Materiál | hliník |
| Tepelná vodivost | 204 W/m.K |
| Pracovní kapalina | voda |
| Vstupní teplota | 20°C |
| Výstupní teplota | - |
| **TESTOVACÍ MOTOR** | 3l turbocharged |
| **MAXIMÁLNÍ VÝKON** | 408 - 608W |
| **Stav motoru při maximálním generovaném výkonu TEG** | dálniční provoz |
| | - |
| **Celková účinnost při maximálním výkonu TEG** | 7,40% |
| **Účinnost termoelektrické přeměny** | 7,40% |
| **Teplotní rozdíl při maximálním výkonu** | 588°C |

BMW pracuje i na vlastním projektu kde instalovali TEG do EGR (Exhaust Gas Recirculation) chladiče dieselového motoru. EGR termoelektrický generátor je tvořen PbTe trubicemi a dodává 200W. Předpokládá se, že by bylo možné snížit spotřebu a emise až o 2% [33].

**Obr.23:** *EGR chladič se zabudovaným TEG vyvinutý BMW [33]*

### 5.4.6 General Motors

General Motors (GM) pracuje na svém vlastním termoelektrickém generátoru, který je složen ze 42 modulů z toho je jich 30 z PbTe nebo Skutteruditů a 12 z $Bi_2Te_3$. TEG je rozdělen do třech teplotních částí: přední 250°C, střední 178°C a zadní 148°C. Konstrukce se skládá z plochého měděného výměníku, na který jsou umístěny termoelektrické moduly. Na moduly jsou přiložené chladící bloky, které jsou od tepelného výměníku oddělené tepelnou izolací. Při této konstrukci dodával generátor pouze 57 W. Při optimalizaci tepelného výměníku, kdy by se teplota teplé strany zvětšit na $T_h$= 600°C a teplota chladících bloků $T_c$= 100°C, by se výkon zvýšil na 235 W [34],[35].




**Obr.24:** *Konstrukce TEG vyvíjeného GM [35]*

**Tab.7:** *Parametry TEG General Motors*

| | |
|---|---|
| **TEPELNÝ VÝMĚNÍK** | |
| Materiál | měď |
| Tepelná vodivost | 386 W/m.K |
| Pracovní kapalina | výfukové plyny |
| Vstupní teplota | 450°C |
| Výstupní teplota | - |
| **CHLADIČ** | |
| Materiál | hliník |
| Tepelná vodivost | 204 W/m.K |
| Pracovní kapalina | voda |
| Vstupní teplota | 80°C |
| Výstupní teplota | - |
| **TESTOVACÍ MOTOR** | Chevy Suburban |
| **MAXIMÁLNÍ VÝKON** | 57 W |
| **Stav motoru při maximálním generovaném výkonu TEG** | - |
| | - |
| **Celková účinnost při maximálním výkonu TEG** | - |
| **Účinnost termoelektrické přeměny** | - |
| **Teplotní rozdíl při maximálním výkonu** | 370°C |

### 5.4.7 Ostatní výrobci

**Volkswagen**

V roce 2008 na konferenci v Berlíně představil Volkswagen prototyp svého termoelektrického generátoru využívajícího odpadního tepla výfukových plynů na svém automobilu VW Golf. Volkswagen uvádí, že výstupní výkon činí 600W při podmínkách jízdy po dálnici. Tímto uspokojí 30% požadavků na elektrickou energii a dojde k snížení spotřeby o 5% [36].

**Renault**

Renault ve spolupráci s Volvem představil v rámci projektu RENOTER studii, při které chce TEG dosahující výkonu 1kW u nákladních aut a 300W u osobních aut. Pro N-typ byl použit $Mg_2Si$ a pro P-typ $MnSi_{1.77}$ materiál. Při testování a simulacích bylo dosaženo výkonu 160 W u osobních automobilů 400W u nákladních [37].

## 5.5 Výhledy do budoucna

V tuhle dobu je u většiny projektů vyvíjejících TEG, využívající odpadní teplo výfukových plynů u automobilů, hlavním cílem dosáhnou výkonu 1kW. Předpokládá se, že toho bude možno dosáhnout výhledově během několika následujících let a bude možno ušetřit až 5% paliva. V nejbližší době se také plánuje použití v sériově vyráběných vozech[33].

Celkovým cílem je dosáhnout takového výkonu, který by pokryl veškeré nároky automobilu na elektrickou energii. Díky tomu by bylo možné úplné nahrazení alternátoru. Z toho vyplývá úspora paliva a zvýšení účinnosti motoru. Aby bylo možné dosáhnout takového výkonu, je zapotřebí najít nové materiály s vysokým koeficientem termoelektrické účinnosti ZT.

## 5.6 Energetická bilance při použití TEG

Podle statistik[47];[48], je v Evropě 234 mil. automobilů, ty jsou používaná průměrně 200 hodin ročně a dohromady ujedou $2{,}7*10^{12}$ km ročně. U nově vyrobených aut je průměrná produkce $CO_2$ přibližně 150g/km (z toho vyplývá přibližná spotřebě 6 l/100km). Zajímá nás, jaké množství elektrické energie mohlo být vyprodukováno za rok, při použití TEG s předpokládaným výkonem 1kW (úspora paliva 5%). To lze vypočítat ze vztahu:

$$E_v = t_r \cdot A_e \cdot P_{TEG} = 200 \cdot 234 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 10^3 = \underline{46{,}8}\ [TWh]$$

To je téměř jak roční produkce pěti elektráren o výkonu 1000 MW. Množství ušetřeného paliva při úspoře paliva 5% je:

$$V_{upl} = S_p \cdot D_o \cdot 0{,}05 = \frac{6\ \cdot 2{,}7 \cdot 10^{12} \cdot 0.05}{100} = \underline{8{,}1 \cdot 10^9}\ \ [l]$$

$$V_{upm} = \frac{V_{upl}}{1000} = \frac{8{,}1 \cdot 10^9}{1000} = \underline{8{,}1 \cdot 10^6}\ [m^3]$$

$$m_{up} = \rho_p \cdot V_{upm} = 800 \cdot 162 \cdot 10^6 = \underline{6{,}48 \cdot 10^6}\ [t]$$

Z toho jsme zjistili, že za rok by bylo možno ušetřit $8{,}1 \cdot 10^9$ l paliva, což je $8{,}1 \cdot 10^6$ $m^3$ nebo $6{,}48 \cdot 10^6$ t ušetřeného paliva.

Shrneme-li výše uvedené výsledky, zjistíme, že při použití TEG o výkonu 1kW můžeme uspořit ročně 46,8 TWh elektrické energie a 6,48 mil. tun paliva ročně. Tyto hodnoty jsou ovšem pouze přibližné a jejich výpočet je značně zjednodušený.

# 6. ZÁVĚR

Při analýze současného stavu automobilové dopravy si povšimneme trendu zvyšujících se požadavků automobilů na elektrickou energii. Tento trend je zapříčiněn nárůstem počtu zařízení v automobilu vyžadujících pro svou činnost elektrickou energii. Když k zvyšujícím elektrickým požadavkům přičteme tlak na snižování spotřeby a emisí a celkového dopadu automobilové dopravy na životní prostředí, naskytl se prostor pro vývoj technologií zvyšující účinnost spalovacího motoru.

Pístový spalovací motor, používaný jako pohonná jednotka téměř všech dnes vyráběných automobilů, je tepelný stroj pracující v opakujících se termodynamických cyklech, při kterých přeměňuj tepelnou energii dodanou palivem na energii pro pohon vozidla. To vše činí s určitou účinností. Pro zvýšení účinnosti pístového spalovacího motoru je potřeba se seznámit s energetickou bilancí motoru. Z té vyplynulo, že přeměna energie paliva je značně nedokonalá a dochází k velkým ztrátám. K těmto ztrátám dochází především odchodem tepla výfukovými plyny a chlazením motoru. Při porovnání bilancí zážehového a vznětového motoru je vidět, že největší ztráty u zážehového motoru činí ztráty výfukem (30÷50%). U vznětových motorů je tato hodnota o něco menší (25÷45%) i přesto činí největší podíl ztrát. Za povšimnutí stojí u vznětových motorů i ztráty chlazením (15÷35%), které tvoří nezanedbatelnou položku ztrát. Po seznámení s energetickými bilancemi motorů se jeví za nejvhodnější využít právě tyto ztrátová odpadní tepla a to s použití rekuperační jednotky. Tu bylo vhodné umístit do výfukového systému automobilu, je však zapotřebí vhodně zvolit umístění, jelikož se ve výfukovém systému nachází i jiná zařízení a rekuperační jednotka by moha neblaze ovlivnit jejich funkčnost.

Vývoj rekuperačních jednotek využívajících odpadního tepla výfukových plynů se dnes převážně směřuje na dvě technologie, jedné využívajícího parního Rankin-Clausiova cyklu (RC) a druhá využívající termoelektrické přeměny. Jednotky využívající RC se vždy skládají z výměníku tepla (výparníku), turbíny (expandér), kondenzátoru a čerpadla. Konstrukce těchto komponent se pak v konkrétních aplikacích různí. RC jednotky dodávají poměrně vysoký výkon, je však zapotřebí zvolit vhodnou pracovní látku s vysokou výparnou entalpií. Nevýhodou RC jednotek je, že jsou tvořeny více komponenty, z nichž jsou některé mechanické, to zvyšuje nároky na údržbu a pravděpodobnost poruchy. Také hrozí nadměrné ochlazování výfukových plynů a zhoršení jejich odchodu ze spalovací komory, což má za následek snížení účinnosti spalovacího procesu a v důsledku toho zvýšení spotřeby.

Na využití termoelektrické přeměny v rekuperačních jednotkách se vývojáři zaměřili především z důvodu přímé přeměny tepelné energie na energii elektrickou, bez nutnosti jakýchkoliv dalších mechanických částí. Rekuperační jednotka využívající termoelektrické přeměny se nazývá termoelektrický generátor (TEG). TEG se skládá vždy z výměníku tepla pro teplou a studenou stranu (chladič) a vhodně konstrukčně uspořádaných termoelektrických modulů. Technologie TEG je známá již mnoho let, ale doposud byla využívána pouze v aplikacích, kde nebyla jiná možnost zdroje energie, to především z důvodu malé účinnosti a

vysoké ceny vůči dodávanému výkonu. To se změnilo až s příchodem nových moderních kompozitních materiálů a nanomateriálů. Účinnost a generovaný výkon TEG závisí na vlastnostech termoelektrických materiálů, které jsou zahrnuty v koeficientu termoelektrické účinnosti ZT. Právě na nalezení materiálu s co nejvyšším koeficientem ZT se soustřeďuje pozornost vývojářů TEG a předpokládá se jeho zvýšení. Největší naděje jsou vkládány do materiálů se skutteruditovou strukturou a různých druhů nanostruktur s kvantovými efekty.

Na poli TEG využívajících odpadního tepla výfukových plynů automobilů dosahuje nejlepších výsledků firma BMW, která svůj první TEG představila v roce 2008. V této době se podílí na vývoji TEG v projektu podporovaného Ministerstvem energetiky USA. TEG, na jehož vývoji se BMW podílí, dosahuje výkonu 600W a předpokládá se, že se tato hodnota navýší až na 1kW. To je však cílem všech projektů pracujících na konstrukci TEG. Výrobci TEG chtějí do roku 2015 začít s montáží TEG do sériově vyráběných vozů. Hodnoty, které výrobci uvádí u parametrů TEG, však bývají dost často neúplné a především nadnesené, proto lze předpokládat, že sériové použití TEG v automobilech bude v mnohem vzdálenějším horizontu. Pokud by se však prognózy naplnily, bylo by možné ušetřit velké množství paliva a energie. Předpokládá se, že by bylo možné úplné nahrazení alternátoru, tím by se zvýšila účinnost motoru z důvodu odstranění mechanických ztrát pro pohon alternátoru a využití části tepelné energie výfukových plynů, která by jinak odešla bez využití do ovzduší.

Aby bylo možné běžné využití TEG, je nutné zvýšit jejich účinnost a výkon, to však je zcela závislé na nalezení nových materiálů s lepšími termoelektrickými vlastnostmi. Do té doby se jejich požití vyplatí jen v menších aplikacích, kde nejsou požadované tak velké výkony.

# SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] JAN, Zdeněk a Bronislav ŽDÁNSKÝ. *Automobily*: *Motory*. 5. vydání. Brno: Avid, spol. s.r.o., 2008. ISBN 978-80-87143-06-3.

[2] HROMÁDKO, Jan. *Spalovací motory*: *komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. 1. vyd. Praha: Grada, 2011, 296 s. ISBN 978-80-247-3475-0 (BROž.).

[3] KALČÍK, Josef a Karel SÝKORA. *Technická termomechanika*. Praha: Academia, 1973, 540 s.

[4] ACEA [European Automobile Manufacturers' Association]: Vehicles in use. [online]. [cit. 2012-03-05]. Dostupné z: http://www.acea.be/images/uploads/files/20100520_2010_KEY_FIGURES_4_Vehicles_in_Use.pdf

[5] ŠTOSS, Milan. Spalovací motory I. 1. vyd. Brno: VUT Brno, 1987, 261 s.

[6] FAIRBANKS, John W. Thermoelectrics Applications Review. In: [online]. 2007 [cit. 2012-05-07]. Dostupné z: http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/deer_2007/session6/deer07_fairbanks.pdf

[7] CO2 emissions from fuel combustion. In: *Environment: Key Tables from OECD* [online]. [cit. 2012-05-08]. ISSN 2075-826x. Dostupné z: http://www.oecd-ilibrary.org/environment/co2-emissions-from-fuel-combustion_2075826x-table1

[8] CO2 Emissions from Fuel Combustion - 2011 Highlights. In: [online]. 2011 [cit. 2012-05-08]. Dostupné z: http://www.iea.org/co2highlights/CO2highlights.pdf

[9] TOOM, Randolph. Waste Heat Regeneration systems for internal combustion engines. In: [online]. 2007 [cit. 2012-05-08]. Dostupné z: http://www.heat2power.net/downloads/GPC2007/20070618_heat2power_GPC_WHR_presentation.pdf

[10] *Stirlingův motor* [online]. © 2010 - 2012 [cit. 2012-05-08]. Dostupné z: http://stirlingmotor.cz/index.html

[11] ROSEBRO, Jack. Honda Researching Advanced Hybrid Drive with Rankine Cycle Co-Generation. [online]. 2008 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: http://www.greencarcongress.com/2008/02/honda-researchi.html

[12] Ford study shows Rankine waste heat recovery system on a light-duty vehicle could almost meet full vehicle accessory load on highway cycle. [online]. 2011 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: http://www.greencarcongress.com/2011/10/ford-study-shows-rankine-waste-heat-recovery-system-on-a-light-duty-vehicle-could-almost-meet-full-v.html

[13] HUSSAIN, Quazi a David BRIGHAM. Organic Rankine Cycle for Light Duty Passenger Vehicles. In: [online]. 2011 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/deer_2011/wednesday/presentations/deer11_hussain.pdf

[14] BMW Study on Rankine Cycle for Waste Heat Recovery Shows Potential Additional 10% Power Output at Highway Speeds. [online]. 2009 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: http://www.greencarcongress.com/2009/05/bmw-rankine-20090503.html

[15] Current articles: Saving with steam. In: [online]. BMW Group, 02.02.2006 [cit. 2012-04-01]. Dostupné z: http://www.bmwgroup.com/e/nav/index.html?http://www.bmwgroup.com/e/0_0_www_bmwgroup_com/forschung_entwicklung/science_club/veroeffentlichte_artikel/2006/news20063.html

[16] VOKÁČ, Luděk. Fyzika v praxi podle BMW. Parní turbíny a elektřina z tepla. [online]. 2011 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: http://auto.idnes.cz/fyzika-v-praxi-podle-bmw-parni-turbiny-a-elektrina-z-tepla-p3a-/automoto.aspx?c=A110911_225827_automoto_vok

[17] VACKOVÁ a Josef VACEK. Termoelektrické jevy v polovodičích a rostlinných produktech. [online]. 2011, č. 10 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=44589

[18] KABEŠ, Karel. Význam termoelektrických generátorů rychle roste. [online]. 2011, č. 4 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=43318

[19] MIKYŠKA, Ladislav. *Termoelektrické články*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964, 154 s.

[20] ROWE, David Michael. Thermoelectric generators as alternative sources of low power. Cardiff, 1994. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/0960-1481(94)90191-0

[21] ROWE, David Michael. *CRC handbook of thermoelectrics*. Boca Raton, FL: CRC Press, c1995, 701 s. ISBN 08-493-0146-7.

[22] ROWE, David Michael. Economic Thermoelectric Recovery of Low Temperature Heat. In: [online]. 2007 [cit. 2012-04-20], s. 8. Dostupné z: http://ect2007.its.org/system/files/u1/pdf/03.pdf

[23] ANATYCHUK, L.I. Current Status and Some Prospects of Thermoelectricity. In: [online]. 2007 [cit. 2012-04-20], s. 5. Dostupné z: http://ect2007.its.org/system/files/u1/pdf/04.pdf

[24] FAIRBANKS, John. Thermoelectric applicazions in vehicles status 2008. In: [online]. 2008 [cit. 2012-05-03]. Dostupné z: http://ect2008.icmpe.cnrs.fr/Contributions/0-PL-00-Fairbanks.pdf

[25] ROWE, David Michael. Thermoelectric waste heat recovery as a renewable energy source. In: [online]. 2006 [cit. 2012-05-03]. Dostupné z: http://ijesp.com/Vol1No1/IJESP1-3Rowe.pdf

[26] BENSAID, Samir, Mauro BRIGNONE, Alessandro ZIGGIOTTI a Stefania SPECCHIA. High efficiency Thermo - Electric power generator. In: [online]. 2011 [cit. 2012-05-03]. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.09.125. Dostupné z: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319911022725

[27] D. LALONDE, Aaron, Yanzhong PEI, Heng WANG a G. Jeffrey SNYDER. Lead telluride alloy thermoelectrics. In: [online]. 2011 [cit. 2012-05-03]. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/S1369-7021(11)70278-4. Dostupné z: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702111702784

[28] Termoelektrické materiály - Fakulta chemicko-technologická - Univerzita Pardubice. [online]. [cit. 2012-05-03]. Dostupné z: http://www.upce.cz/fcht/slchpl/vyzkum/termo-materialy.html

[29] MEISNER, Gregory. Advanced Thermoelectric Materials and Generator Technology for AutomotiveWaste Heat at GM. In: [online]. 2011 [cit. 2012-05-03]. Dostupné z: http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/thermoelectrics_app_2011/monday/meisner.pdf

[30] SAQR, K. M. *Design and simulation of an exhaust based thermoelectric generator (TEG) for waste heat recovery in passenger vehicles* [online]. Faculty of Mechanical Engineering Universiti Teknologi Malaysia, 2008. 128 s. Diplomová práce. Dostupné z: http://eprints.utm.my/10048/1/KhalidMohammedMohieeMFKM2008.pdf

[31] CRANE, Doug a John LAGRANDEUR. Thermoelectric Generator Performance for Passenger Vehicles. In: [online]. 20.3.2011 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/thermoelectrics_app_2012/tuesday/crane.pdf

[32] BELL, Lon, Doug CRANE a John LAGRANDEUR. Development of a 500 Watt High Temperature Thermoelectric Generator. In: [online]. 5.8.2009 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/deer_2009/session7/deer09_lagrandeur.pdf

[33] EDER, Andreas a Matthias LINDE. Efficient and Dynamic – The BMW Group Roadmap for the Application of Thermoelectric Generatos. In: [online]. San Diego, 3.1.2011 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/thermoelectrics_app_2011/monday/eder.pdf

[34] YANG, Jihui. Develop Thermoelectric Technology for Automotive Waste Heat Recovery. In: [online]. Dearborn, 5.8.2009 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/deer_2009/session7/deer09_yang_2.pdf

[35] MEISNER, Gregory. Skutterudite Thermoelectric Generator For Automotive Waste Heat Recovery. In: [online]. Baltimore, 25.3.2012 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/thermoelectrics_app_2012/wednesday/meisner.pdf

[36] ROWE, David. Thermoelectric power for automobiles arrives in Europe. [online]. 2.2.2009 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: http://www.its.org/node/5682

[37] AIXALA, Luc. RENOTER Project. In: [online]. Baltimore, 20.3.2012 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/thermoelectrics_app_2012/tuesday/aixala.pdf

[38] WIJAYA, Willy. Blog of Willy Yanto Wijaya. [online]. 17.10.2009 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: http://willyyanto.wordpress.com/tag/t-s-diagram/

[39] BMW Turbosteamer - Hybrid Engine Technology - Motor Trend. MOTOR TREND. [online]. 2006 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: http://www.motortrend.com/features/editorial/112_0606_technologue_hybrid_qa/photo_02.html

[40] KUSALA, Jaroslav. Mikroenciklopedie - Elektřina: Polovodiče. CEZ. [online]. 2003 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: http://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/fyz9.htm

[41] CRANE, Douglas, John LAGRANDEUR a Lon BELL. Status of Segmented Element Thermeoeletric Generator for Vehicle Waste Heat Recovery. In: [online]. San Diego, 1.3.2011 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/thermoelectrics_app_2011/monday/crane.pdf

[42] JÄCKLE, J. The origin of the thermoelectric potential: The Seebeck effect. UNIVERSITY OF KONSTANZ. [online]. 7.11.2000 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: http://www.uni-konstanz.de/FuF/Physik/Jaeckle/papers/thermopower/node1.html

[43] Construction of thermoelectric modules. KRYOTHERM. [online]. Saint-Petersburg [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: http://www.kryotherm.ru/index.phtml?tid=87

[44] FIEDLER, Jan a Jiří POSPÍŠIL. Výhody a omezení malých kogeneračních jednotek. In: [online]. 26.9.2011 [cit. 2012-05-21]. ISSN ISSN 1801-4399. Dostupné z: http://vytapeni.tzb-info.cz/7866-vyhody-a-omezeni-malych-kogeneracnich-jednotek

[45] POSPÍŠIL, Jiří a Jan FIEDLER. Systémy společné výroby elektrické energie, tepla a chladu. In: [online]. 31.5.2010 [cit. 2012-05-21]. ISSN ISSN 1801-4399. Dostupné z: http://oze.tzb-info.cz/kogenerace/6519-systemy-spolecne-vyroby-elektricke-energie-tepla-a-chladu

[46] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 192 s. ISBN 978-80-214-4300-6.

[47] The drive towards fuel efficiency. ACEA [EUROPEAN AUTOMOBILE MANUFACTURERS' ASSOCIATION]. [online]. 2010 [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: http://www.acea.be/images/uploads/files/20111011_KEY_FIG2011_CO2.pdf

[48] OECD. *OECD Environmental data*: *Transport* [online]. 2007 [cit. 23.5.2012]. Dostupné z: http://www.oecd.org/document/0,3746,en_2649_201185_46462759_1_1_1_1,00.html

# SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK

| Veličina | Symbol | Jednotka |
|---|---|---|
| Energie dodaná palivem | $Q_p$ | J |
| Energie přeměněná na efektivní práci | $Q_e$ | J |
| Energie ztracená nedokonalým spalováním | $Q_{ns}$ | J |
| Energie ztracená chlazením | $Q_{ch}$ | J |
| Energie ztracená výfukovými plyny | $Q_v$ | J |
| Energie ztracená mechanickým třením | $Q_m$ | J |
| Energie ztracená sáláním | $Q_s$ | J |
| Účinnost | $\eta$ | % |
| Rychlost | v | $m \cdot s^{-1}$ |
| Objem | V | l,$m^3$ |
| Výkon | P | W |
| Teplota v stupních celsia | t | °C |
| Tlak | p | Pa |
| Výparná entalpie | h | $kJ \cdot kg^{-1}$ |
| Seebeckův koeficient | $\alpha$ | $V \cdot K^{-1}$ |
| Koeficient Termoelektrické účinnosti | ZT | - |
| Elektrická vodivost | $\sigma$ | $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ |
| Tepelná vodivost | $\lambda$ | $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ |
| Teplota v Kelvinech | T | K |
| Teplota Horké strany | $T_h$ | °C |
| Teplota studené strany | $T_c$ | °C |
| Délka | l | m |
| Otáčky | n | $ot \cdot min^{-1}$ |
| Hmotnost | m | kg |
| Tvorba CO2 | - | kg/km |
| Spotřeba | $S_p$ | l/100km |
| Množství vyprodukované energie za rok | $E_v$ | Wh |
| Hodinový provoz za rok | $t_r$ | h |
| Velikost vozového parku v Evropě | $A_e$ | - |
| Výkon dodávaný TEG | $P_{TEG}$ | W |
| Obem ušetřeného paliva v litrech | $V_{upl}$ | L,l |
| Objem ušetřeného paliva v metrech krychlových | $V_{upm}$ | $m^3$ |
| Množství ušetřeného paliva | $m_{up}$ | kg,t |
| Dopravní objem | $D_o$ | km |
| Hustota paliva | $\rho_p$ | $kg \cdot m^{-3}$ |

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr.1: Průběh Ottova cyklu ..... 14
Obr.2: Průběh Dieslova cyklu ..... 14
Obr.3: Schéma energetické bilance zážehového motoru ..... 16
Obr.4: Schéma energetické bilance vznětového motoru ..... 16
Obr.5: Schéma Stirlingova motoru ..... 20
Obr.6: Schéma zapojení komponent systému pro využití odpadního tepla od Hondy ..... 21
Obr.7: Uspořádání v motoru automobilu Honda Stream ..... 22
Obr.8: Zobrazení tepelných okruhů v Turbosteamer ..... 24
Obr.9: Výfukový tepelný výměník Turbosteameru ..... 25
Obr.10: Schéma Seebeckova jevu ..... 26
Obr.11: A) vznik nevlastního polovodič N, B) vznik nevlastního polovodiče P ..... 28
Obr.12: Schéma průchodu proudu a elektronů při použití polovodičů P a N ..... 28
Obr.13: Termoelektrický modul ..... 29
Obr.14: Schematické zobrazení TEG ..... 30
Obr.15: Schematické zobrazení konstrukce TEG University Karsruhe ..... 34
Obr.16: Konstrukce TEG firmy Hi-Z ..... 35
Obr.17: Schéma TEG Nissan Mototrs ..... 37
Obr.18: TEG navržený na univerzitě v Clarkson ..... 38
Obr.19: Konstrukce TEG použitého v BMW X6 ..... 39
Obr.20: TE článek uspořádaná do stagu ..... 39
Obr.21: Uložení TE článků ..... 39
Obr.22: Konstrukce TEG BMW a uložení termoelektrických článků mezi tepelným výměníkem a chladícími trubkami ..... 40
Obr.23: EGR chladič se zabudovaným TEG vyvinutý BMW ..... 41
Obr.24: Konstrukce TEG vyvíjeného GM ..... 41

# SEZNAM GRAFŮ

Graf.1: Velikost vozového parku v členských zemích asociace evropských výrobců automobilů ACEA ..... 11
Graf.2: Rozdělení vozového parku v Evropě podle použitých pohonných jednotek ..... 11
Graf.3: Požadavky na elektrickou energii moderních automobilů ..... 12
Graf.4: Hlavní producenti podílející se na tvorbě CO2 ..... 12
Graf.5: Závislost koeficientu termoelektrické účinnosti materiálu na teplotě ..... 31
Graf.6: Vývoj koeficientu termoelektrické účinnosti v letech ..... 31
Graf.7: Účinnost generátoru v závislosti na vstupní teplotě ..... 32
Graf.8: Charakteristika materiálů pro TEG ..... 33
Graf.9: Koeficient ZT skutteruditních materiálů v závislosti na rozsahu teplot ..... 33

# SEZNAM TABULEK

Tab.1: Tabulka tepelných bilancí motorů ..... 18
Tab.2: Parametry TEG University Karsruhe ..... 35
Tab.3: Parametry TEG společnosti Hi-Z ..... 36
Tab.4: Parametry TEG společnosti Nissan Motors ..... 37
Tab.5: Parametry TEG navržený na univerzitě v Clarkson ..... 38
Tab.6: Parametry TEG instalovaného v BMW X6 ..... 40
Tab.7: Parametry TEG General Motors ..... 42