



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

ÚSTAV FYZIKÁLNÍ A SPOTŘEBNÍ CHEMIE

INSTITUTE OF PHYSICAL AND APPLIED CHEMISTRY

**TERMoeLEKTRICKÉ VLASTNOSTI ALKALICKY
AKTIVOVANÝCH HLINITOKŘEMIČITANŮ**

THERMOELECTRIC PROPERTIES OF ALKALI ACTIVATED ALUMINOSILICATES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kristýna Filipská

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Číslo práce: FCH-BAK1848/2022 Akademický rok: 2022/23
Ústav: Ústav fyzikální a spotřební chemie
Studentka: **Kristýna Filipská**
Studijní program: Chemie a chemické technologie
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc.**

Název bakalářské práce:

Termoelektrické vlastnosti alkalicky aktivovaných hlinitokřemičitanů

Zadání bakalářské práce:

- Pojednejte o termoelektrických jevech v materiálech (Seebeckův, Peltierův, Thomsonův) a jejich využití v praxi.
- Proměřte tepelné a termoelektrické vlastnosti vybraných alkalicky aktivovaných aluminosilikátů (multifunkčních AAA) vhodných ke konverzi tepelné energie na elektrickou.
- Z experimentálních dat stanovte základní tepelné (součinitel tepelné vodivosti, měrnou tepelnou kapacitu, teplotní vodivost) a termoelektrické parametry studovaných materiálů (např. Seebeckův, Peltierův a Thomsonův koeficient).
- Výsledky zpracujte do bakalářské práce

Termín odevzdání bakalářské práce: 22.5.2023:

Bakalářská práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí bakalářské práce.

Kristýna Filipská
studentka

prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc.
vedoucí práce

prof. Ing. Miloslav Pekař, CSc.
vedoucí ústavu

V Brně dne 1.2.2023

prof. Ing. Michal Veselý, CSc.
děkan

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá využitím alkalicky aktivovaných hlinitokřemičitanů (AAA) v oblasti získávání elektrické energie termoelektrickou přeměnou. Klade si za cíl přiblížit problematiku termoelektrické konverze jako takové a její výskyt v těchto materiálech. Tyto poznatky podkládá měření termoelektrického napětí vybraných směsí AAA, konkrétně struskových geopolymerů s přidavkem uhlíkových sazí a jak struskových, tak metalupkových geopolymerů s příměsí grafitového prášku. Tato měření byla provedena opakovaným ohřevem jedné plochy vzorku pomocí rezistoru a zaznamenáváním odezvy v podobě napětí ve vzorku i na elektrodách. Z naměřených hodnot byl pro jednotlivé vzorky vypočten Seebeckův koeficient, jehož nejvyšší hodnota byla zjištěna pro alkalicky aktivovanou strusku s příměsí uhlíkových sazí o koncentraci 4 % ($|\alpha| = 1904 \mu\text{V/K}$). Dalším cílem bylo měření tepelných vlastností, jmenovitě měrné tepelné kapacity, součinitele tepelné vodivosti a tepelné difuzivity; toho bylo dosaženo prostřednictvím snímkování ohřívaných vzorků termokamerou. Nejvyšší hodnoty měrné tepelné kapacity i součinitele tepelné vodivosti bylo dosaženo ve vzorku metalupkového geopolymeru s koncentrací grafitového prášku 8 % ($c = 2086 \text{ J/kg/K}$; $\lambda = 1,815 \text{ W/m/K}$). Tepelnou difuzivitu vykazovaly veškeré vzorky téměř stejnou, a to $6 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ v průměru. Na základě výsledných hodnot usuzujeme, že termoelektrická konverze v těchto materiálech zatím nedosahuje hodnot potřebných pro významnou regeneraci elektrické energie ve větším měřítku, domníváme se však, že s dalším výzkumem lze dosáhnout hodnot vyšších.

KLÍČOVÁ SLOVA

Seebeckův jev, Peltierův jev, Thomsonův jev, Jouleovo teplo, termočlánek, termoelektrický generátor, alkalicky aktivované hlinitokřemičitan, energy harvesting

ABSTRACT

This work focuses on the potential usage of alkali-activated aluminosilicates (AAA) in relation to energy harvesting. It sets a goal of familiarizing the reader with thermoelectrical conversion itself and its existence within those materials. Based on this knowledge, the measurement of thermoelectrical voltage has been conducted in chosen mixtures of AAA; more specifically a slag geopolymer with carbon black admixture, a slag geopolymer with graphite powder admixture and a metashale geopolymer with graphite powder admixture. This experiment was executed by repeated heating of the surface area of the sample on one side using a resistor, while the other side was kept at reference temperature. The response in the form of voltage generated in the sample as well as on the electrodes was recorded. The measured values were then used to calculate the Seebeck coefficient. The best response was provided by a slag geopolymer sample with carbon black admixture at 4 % concentration ($|\alpha| = 1904 \mu\text{V/K}$). The second goal was to measure thermal properties of those samples, specifically the specific heat capacity, the thermal conductivity coefficient and thermal diffusivity. This goal has been reached by capturing the samples with a thermal camera while heating them on a hot-plate. The highest values of specific heat capacity and the thermal conductivity coefficient were provided by a sample of metashale geopolymer with graphite powder admixture at 8 % concentration ($c = 2086 \text{ J/kg/K}$; $\lambda = 1,815 \text{ W/m/K}$). Thermal diffusivity proved to be almost identical in all samples, $6 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ on average. Based on the results, we conclude that the thermoelectrical conversion in these materials is not enough to be significant in bigger scale energy harvesting yet. However, we also believe that it's possible to reach better results with further research.

KEYWORDS

Seebeck effect, Peltier effect, Thomson effect, Joule heating, thermocouple, thermoelectric generator, alkali-activated aluminosilicates, energy harvesting

FILIPSKÁ, Kristýna. *Termoelektrické vlastnosti alkalicky aktivovaných hliníkokřemičitanů* [online]. Brno, 2023 [cit. 2022-11-12]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/145003>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav fyzikální a spotřební chemie. Vedoucí práce Oldřich Zmeškal.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně, a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citovala. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího diplomové práce a děkana FCH VUT.

.....

podpis studenta

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych ráda poděkovala svému vedoucímu prof. Ing. Oldřichu Zmeškalovi, CSc. za všechny čas, který mi po celou dobu tvorby této práce věnoval, za odborné vedení, vstřícný přístup, a za pomoc při řešení veškerých otázek a nesrovnalostí, které se v průběhu vyskytly. Dále bych ráda poděkovala svým spolužákům z oboru za vzájemnou podporu a v neposlední řadě děkuji členům své rodiny za veškerou podporu, kterou mi poskytují, a bez nichž by pro mě studium nebylo možné.

OBSAH

| | |
|---|----|
| 1 Úvod | 5 |
| 2 Teoretická část..... | 6 |
| 2.1 Termoelektrické jevy v materiálech | 6 |
| 2.1.1 Seebeckův jev | 6 |
| 2.1.2 Peltierův jev | 8 |
| 2.1.3 Jouleovo teplo | 9 |
| 2.1.4 Thomsonův jev..... | 10 |
| 2.2 Význam a využití termoelektrických jevů v praxi..... | 11 |
| 2.2.1 Termoelektrická zařízení sloužící jako zdroj elektrické energie | 11 |
| 2.2.2 Termoelektrická zařízení sloužící pro transport tepla..... | 14 |
| 2.2.3 Termoelektrická měřicí zařízení | 15 |
| 2.3 Alkalicky aktivované hlinitokřemičitany | 17 |
| 2.3.1 Alkalická aktivace a obecné složení AAA..... | 17 |
| 2.3.2 Současný stav zkoumané problematiky | 18 |
| 3 Experimentální část | 21 |
| 3.1 Popis vzorků | 21 |
| 3.2 Měření termoelektrického napětí..... | 22 |
| 3.2.1 Uspořádání experimentu | 22 |
| 3.2.2 Výsledky a diskuze | 23 |
| 3.3 Měření tepelných vlastností..... | 28 |
| 3.3.1 Uspořádání experimentu | 28 |
| 3.3.2 Výsledky a diskuze | 29 |
| 4 Závěr..... | 33 |
| 5 Zdroje..... | 35 |
| 6 Seznam použitých zkratk a symbolů | 41 |
| 7 Přílohy | 43 |
| 7.1 Seebeckův koeficient v závislosti na teplotním rozdílu | 43 |
| 7.2 Teplotní profily jednotlivých vzorků..... | 45 |

1 ÚVOD

Termoelektrický jev je v současné době podstatou mnoha zařízení, která již léta tvoří významnou součást lidské civilizace. Jeho potenciální využití v oblasti regenerace elektrické energie však zůstává z velké části opomíjeno.

Tato práce si tudíž klade za cíl přiblížit tuto problematiku v rešerši s důrazem na potenciální využití stavebních materiálů, konkrétně alkalicky aktivovaných hlinitokřemičitanů (AAA), a podložit ji měřením termoelektrických (Seebeckův koeficient) a tepelných (měrná tepelná kapacita, součinitel tepelné vodivosti, tepelná difuzivita) vlastností vybraných směsí AAA.

V první části se práce věnuje termoelektrickému jevu jako takovému. Jsou zde rozebrány jednotlivé jevy, které tento souhrnný pojem utváří; jejich princip, jak jsou charakterizovány a jak spolu souvisí. V další části následuje využití těchto jevů v praxi se zaměřením převážně na zařízení, která jsou v současné době využívána pro termoelektrickou konverzi.

V další části již přecházíme k alkalicky aktivovaným hlinitokřemičitanům v kontextu stavebních materiálů. Je zde stručně shrnut jejich vznik a složení, o něco rozsáhlejší část je následně věnována uvedení tepelných a elektrických vlastností AAA v porovnání s portlandským cementem, rozdílům v ekologickém dopadu a krátké rešerši současného stavu bádání v oblasti termoelektrických vlastností AAA s vodivou příměsí.

V experimentální části jsou zpočátku charakterizovány jednotlivé vzorky z hlediska jejich hmotnosti, rozměrů a hustoty pro účely pozdějších výpočtů. Měřeno bylo celkem jedenáct vzorků ve čtyřech sadách označených podle typu geopolymeru a příměsí; GP označuje struskový geopolymer s grafitovým práškem, CB struskový geopolymer s přídavkem sazí, MGP je metalupkový geopolymer s přídavkem grafitového prášku a REF je označením pro referenční vzorky, které vodivou příměs neobsahují. Pro vzorky řady MGP je v kapitole uvedeno i složení, pro ostatní vzorky konkrétní složení není k dispozici.

Další kapitola je již zaměřena na samotné měření termoelektrických vlastností, které bylo prováděno metodou cyklu opakovaného ohřevu a chlazení jedné plochy vzorku. První podkapitola shrnuje uspořádání experimentu, zatímco druhá obsahuje diskuzi výstupů z měření a zjištěných hodnot Seebeckova koeficientu v souvislosti s koncentrací vodivé příměsí ve vzorku.

Poslední kapitola je věnována měření tepelných vlastností, které bylo prováděno snímkováním termokamerou za ohřevu vzorků na hot-plate. Diskutuje se zde uspořádání experimentu následované diskuzí výsledků; kapitola tedy obsahuje zjištěné hodnoty měrné tepelné kapacity, součinitele tepelné vodivosti, tepelnou difuzivitu a jejich korelaci s koncentrací vodivé příměsí.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Termoelektrické jevy v materiálech

Termoelektrickým jevem obecně nazýváme termodynamicky vratnou změnu tepelného stavu tělesa, která je přímým důsledkem působení elektrického napětí a naopak. Pokud se ale chceme zabývat tímto jevem do větší hloubky, musíme se zaměřit na tři další jevy, které se skrývají pod souhrnným pojmem „termoelektrický jev“. Konkrétně se jedná o **Peltierův**, **Seebeckův** a **Thomsonův jev**; každému z nich je níže věnována podkapitola. [1]

2.1.1 Seebeckův jev

Německý fyzik Thomas Johann Seebeck roku 1821 provedl experiment, ve kterém objevil vznik magnetického pole kolem smyčky ze dvou různých kovů s teplotním rozdílem mezi jednotlivými spoji. [2]

Předmětem Seebeckova původního experimentu byla smyčka tvořená spojením měděného proužku s proužkem bismutu ve dvou bodech (viz Obr. 1). Zahříváním jednoho ze spojů se mu poté podařilo vychýlit střílku kompasu. Dalšími experimenty se prokázalo, že podobné výsledky dostaneme s kteroukoliv dvojicí vodičů. Seebeck tento jev původně nazval termomagnetickým, později byl ale správně přejmenován na termoelektrický. Dnes by použití pojmu „termomagnetický jev“ mohlo vést k nechtěné záměně s jiným jevem objeveným roku 2013, který využívá obdoby Seebeckova jevu, kde se místo vodičů využívají izolanty, což vede ke změně spinu elektronů vlivem zahřívání; tímto jevem se zde ale dále zabývat nebudeme. [2],[3]

Vraťme se tedy k termoelektrickému Seebeckově jevu; víme již, že spojením dvou různých vodičů a vytvořením teplotního rozdílu mezi jejich spoji, se vygeneruje magnetické pole; to ale představuje pouze jednu ze složek, druhou složkou je pole elektrické, kterému se zde budeme věnovat přednostně. Jak tedy vzniká toto elektrické pole?

Zahříváním spoje mezi dvěma vodiči dodáváme elektronům energii potřebnou k překonání potenciálové bariéry v místě kontaktu vodičů. Tato energie se nazývá výstupní práce A (J)

$$A = q_e U_V, \quad (1)$$

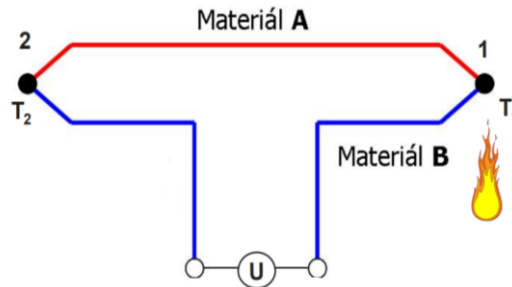
kde q_e (C) je náboj elektronu a U_V (V) označuje rozdíl potenciálů. Pokud je tato práce překonána, volné elektrony mohou přecházet mezi vodiči. Vzniká tak velmi jednoduchý uzavřený elektrický obvod, kde má proud směr od zahřívajícího konce s vyšší energií ke konci chladnému, kde je energie nižší. Záporný pól tedy vzniká na chladném konci, zatímco na zahříváném spoji dojde ke kladnému nabití. [4]

Seebeckův jev bychom tedy mohli jednoduše popsat, jako elektromotorické napětí, které vzniká v důsledku aplikování teplotního rozdílu na kontakt 2 různých vodičů v uzavřeném obvodu.

Charakteristikou Seebeckova jevu je poměr mezi vzniklým elektromotorickým napětím ΔU (V) a rozdílem teplot $(T_2 - T_1)$ (K); označujeme ho jako **Seebeckův koeficient** α ($V \cdot K^{-1}$)

$$\alpha = \frac{\Delta U}{T_2 - T_1}, \quad (2)$$

řádově je Seebeckův jev schopen vygenerovat napětí několik μV na 1 K teplotního rozdílu. V praxi je hojně využíván ve formě termočlánků v zařízeních, která nevyžadují velká napětí, např. teplotní čidla či akční členy, které regulují větší mechatronické soustavy. [5],[1]



Obr. 1: Schéma Seebeckova jevu [6]

Tabulka 1: Seebeckův koeficient některých vodičů a polovodičů (vztaženo k Pt) [7]

| Kov | α ($\mu\text{V/K}$) | Polovodič | α ($\mu\text{V/K}$) |
|------------|------------------------------|--|------------------------------|
| Sb | 47 | Se | 900 |
| Nichrom | 25 | Te | 500 |
| Mo | 10 | Si | 440 |
| Cd | 7,5 | Ge | 300 |
| W | 7,5 | Bi ₂ Te ₃ (n-tyt) | -230 |
| Au | 6,5 | Bi _{2x} Sb _x Te ₃ (p-tyt) | 300 |
| Ag | 6,5 | Sb ₂ Te ₃ (p-tyt) | 185 |
| Cu | 6,5 | PbTe | -180 |
| Rh | 6,0 | Pb ₀₃ Ge ₃₉ Se ₅₈ | 1670 |
| Ta | 4,5 | Pb ₀₆ Ge ₃₆ Se ₅₈ | 1410 |
| Pb | 4,0 | Pb ₀₉ Ge ₃₃ Se ₅₈ | -1360 |
| Al | 3,5 | Pb ₁₃ Ge ₂₉ Se ₅₈ | -1710 |
| C | 3,0 | Pb ₁₅ Ge ₃₇ Se ₅₈ | -1990 |
| Hg | 0,6 | SnSb ₄ Te ₇ | 25 |
| Pt | 0 | SnBi ₄ Te ₇ | 120 |
| Na | -2,0 | SnBi ₃ Sb ₁ Te ₇ | 151 |
| K | -9,0 | SnBi _{2,5} Sb _{1,5} Te ₇ | 110 |
| Ni | -15 | SnBi ₂ Sb ₂ Te ₇ | 90 |
| Konstantan | -35 | PbBi ₄ Te ₇ | -53 |
| Bi | -72 | | |

2.1.2 Peltierův jev

Peltierův jev přímo souvisí s jevem Seebeckovým; zatímco Seebeckův jev popisuje vznik elektromagnetického pole v důsledku dodávání tepla, Peltierův jev se zabývá teplem přeneseným v důsledku vzniku elektrického proudu. [8]

Mějme tedy opět stejný obvod, jako v předchozí kapitole. Pokud je do smyčky přiveden stejnosměrný elektrický proud, teplo se začne v důsledku přesouvat mezi spoji. Jeden ze spojů se začne zahřívat a druhý ochlazovat, čímž vzniká teplotní gradient obdobný tomu, který je záměrně vytvářen při tvorbě elektromagnetického pole u Seebeckova jevu (viz Obr. 2). Ve své podstatě se tedy jedná o jevy sobě inverzní; z tohoto důvodu se často označují souhrnně jako Peltier-Seebeckův jev. [8], [1]

Který ze spojů se bude zahřívat a který ochlazovat závisí na směru proudu, který je do obvodu přiváděn. Pokud má proud v kontaktním místě mezi vodiči stejný směr jako proud, který by vznikl zahřátím tohoto spoje, bude se spoj ochlazovat. Pokud má směr opačný, bude se zahřívat. [8]

Obdobně jako je Seebeckův koeficient charakteristikou Seebeckova jevu, existuje i **Peltierův koeficient** π ($J \cdot C^{-1}$), který charakterizuje jev Peltierův. Je definován jako poměr tepelného toku dQ/dt ($J \cdot s^{-1}$) vůči elektrickému proudu I (A) přiváděnému na obvod

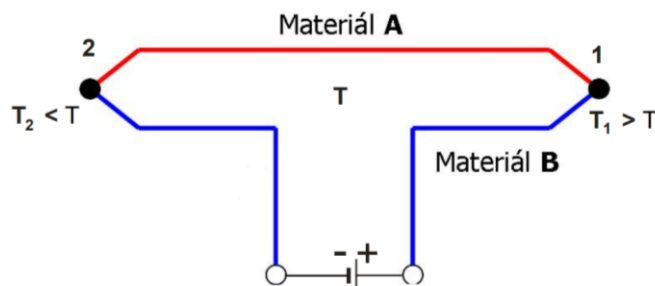
$$\pi = \frac{dQ}{I dt}, \quad (3)$$

tento koeficient se běžně neměří z toho důvodu, že by bylo zapotřebí změřit přesně množství předaného tepla. Využívá se proto jednodušší metody jeho zjištění, a to ze Seebeckova koeficientu, který je možno změřit pomocí teplotních rozdílů spojů. Vztah mezi Seebeckovým a Peltierovým koeficientem je následující

$$\pi = \alpha T, \quad (4)$$

kde T (K) označuje teplotu spoje. [1],[9]

Peltierův jev má své využití převážně v topných či chladicích zařízeních, která nevyžadují vysokou účinnost. V těchto zařízeních se na jedné straně odebírá teplo, které se na druhé straně opět vydává; toto teplo ale není konstantní z důvodu přítomnosti **Jouleova tepla**, které se místy uvádí jako další složka termoelektrického jevu i přes svou nevratnou povahu. [10], [9]



Obr. 2: Schéma Peltierova jevu [6]

2.1.3 Jouleovo teplo

Jouleovým teplem či ohmickým teplem je nazýván proces, kdy průchod elektrického proudu vodičem má za důsledek produkci tepla. Na rozdíl od Peltierova a Seebeckova jevu se ale jedná o termodynamicky nevratný proces, který je přítomen ve všech elektricky vodivých materiálech, tudíž bude ovlivňovat i soustavy založené na termoelektrickém jevu.

Příčinou vzniku tohoto tepla je pohyb nosičů náboje, v našem případě elektronů, které naráží na stacionární částice tvořící krystalickou mřížku, čímž jim předávají část své energie; tato energie poté vede k vibracím těchto částic a následné emisi tepla, jehož množství je úměrné elektrickému odporu a čtverci elektrického proudu. Pro stejnosměrný elektrický proud tedy bude platit vztah

$$Q = RI^2t, \quad (5)$$

kde Q (J) je množství uvolněného tepla, R (Ω) značí odpor vodiče, I (A) označuje procházející elektrický proud a t (s) je doba průchodu proudu. Tento vztah se označuje jako **Jouleův zákon**. S využitím Ohmova zákona lze dojít k vyjádření pomocí napětí na koncích vodiče U (V)

$$Q = UIt, \quad (6)$$

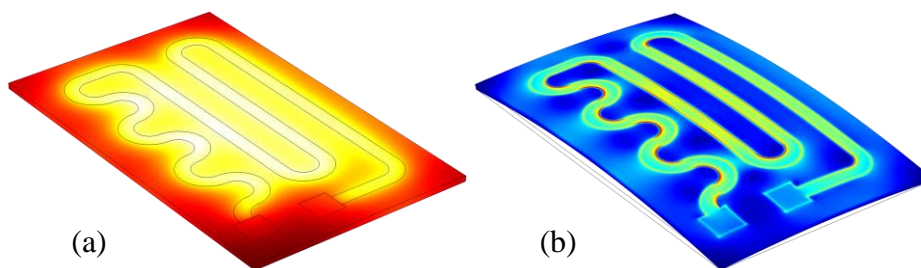
dosazením kalorimetrické rovnice, kde m (kg) značí hmotnost, c ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) měrnou tepelnou kapacitu a ΔT (K) teplotní rozdíl, potom dostaneme vztah $mc\Delta T = UIt$.

Jouleovo teplo lze také stanovit pro jakýkoliv vybraný bod pomocí **diferenciálního tvaru Jouleova zákona (7)**. Ten lze odvodit ze základní myšlenky, že Jouleovo teplo je přeměna elektrické energie na tepelnou v nějakém objemu za nějaký čas.

Vztahem lze toto tvrzení zapsat jako $p = (dW/dt) \cdot (1/dV)$, kde p ($\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$) je objemová hustota výkonu, W (J) je práce a V (m^3) je objem. Dostáváme tedy vztah $p = (dP/dV)$, kde P (W) značí výkon (elektrická energie přeměněná na tepelnou za jednotkový čas) [14]. Výkon lze potom vyjádřit vztahem $P = Fv$, kde F (N) je elektrická složka Lorentzovy síly a v ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) je driftová rychlost. Elektrická složka Lorentzovy síly je $F = qE$, kde E ($\text{N}\cdot\text{C}^{-1}$) označuje intenzitu elektrického pole. Náboj lze vyjádřit jako $q = \rho V$, kde ρ (C/m^3) značí objemovou hustotu náboje. Dosazením dostaneme $P = \rho VEv$, z čehož vyplývá vztah $P = j_L EV$, kde j_L ($\text{A}\cdot\text{m}^2$) označuje hustotu driftového proudu. Derivací podle objemu dostaneme Jouleovo teplo v diferenciálním tvaru [14]

$$\frac{dP}{dV} = j_L \cdot E, \quad (7)$$

Jouleovo teplo má své využití v oblasti elektrických ohřevných zařízení, kde je tepelné sálání žádoucí; v ostatních případech je ale jedním z hlavních zdrojů energetických ztrát a je snaha ho minimalizovat. Jako příklad se nabízí chladicí zařízení založená na Peltierově jevu; v Peltierově jevu se teplotní rozdíl, a tedy i chlazení, zvyšuje se zvyšováním procházejícího proudu. Jouleovo teplo se ale zvyšuje se čtvercem elektrického proudu – bude tedy zásadně snižovat účinnost článku.



Obr. 3: Distribuce tepla při průchodu elektrického proudu vodičem na skleněném podkladu (a) a mechanická deformace v jeho důsledku (b) [15], [16]

2.1.4 Thomsonův jev

V roce 1854 britský fyzik William Thomson, častěji známý jako lord Kelvin z Largsu, objevil třetí a poslední z termoelektrických jevů později po něm i nazvaný – Thomsonův jev. Svou podstatou se jedná o jev velice podobný již zmíněným Seebeckově a Peltierově; hlavní rozdíl tkví v přítomnosti pouze jednoho vodiče namísto smyčky o dvou spojích, se kterou jsme pracovali dosud. [1]

Mějme tedy úsek přímého vodiče x (m); Thomsonův jev říká, že pokud existuje mezi dvěma body tohoto vodiče teplotní rozdíl, vytvoří se s ním i malé elektromotorické napětí U (V). Stejně jako u ostatních termoelektrických jevů se jedná o termodynamicky vratný proces, tudíž platí i opačný případ, kdy se průchodem elektrického proudu I (A) tvoří mezi konci vodiče teplotní gradient dT/dx . Teplo uvolněné v důsledku Thomsonova jevu lze vyjádřit následujícím vztahem

$$\frac{dQ}{dt} = RI^2 - \tau \frac{I}{S} \frac{dT}{dx}, \quad (8)$$

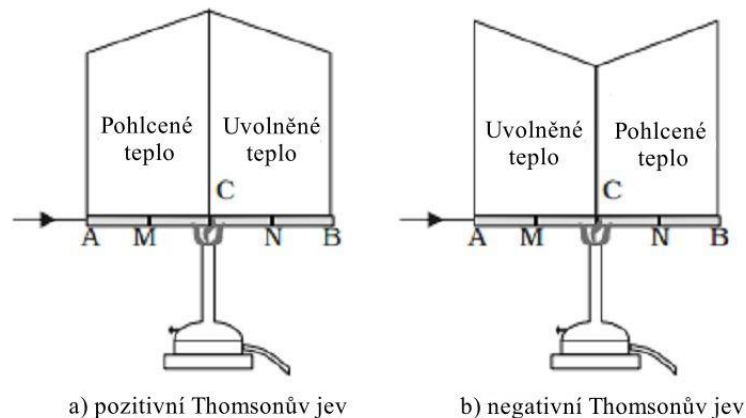
kde dQ/dt (J/s) je výkon, R (Ω) je odpor vodiče, S (m^2) označuje plochu a τ ($V \cdot K^{-1}$) značí Thomsonův koeficient. První člen tvoří vztah (5), který vyjadřuje Joulovo teplo, druhý člen je samotný příspěvek Thomsonova jevu. [17], [18]

Thomsonův koeficient je množství tepla, které se vyvine či spotřebuje k průchodu 1 A po dobu 1 s mezi dvěma body s teplotním rozdílem 1 K. Znaménko Thomsonova koeficientu závisí na materiálu vodiče a směru procházejícího proudu – pokud je nutno spotřebovat energii pro průchod proudu vodičem, považuje se za kladný. Obecně lze pro tyto účely rozdělit kovy na dvě skupiny; první skupina vykazuje tzv. pozitivní Thomsonův jev, druhá naopak negativní Thomsonův jev. [18]

Pozitivní Thomsonův jev vykazují např. Cu, Cd, Zn, Sb, nebo Ag. Jedná se o kovy, které mají v chladném konci nižší potenciál než v horkém konci. Obecně platí, že ve směru od vyššího potenciálu k nižšímu se energie uvolňuje, v opačném případě se energie spotřebovává, tudíž v případě těchto kovů se bude Thomsonovo teplo uvolňovat, pokud bude mít přiváděný proud směr od horkého konce k chladnému. Pokud bude na kov přiváděn proud opačného směru, bude se Thomsonovo teplo spotřebovávat (viz Obr. 4). [18], [19]

Negativní Thomsonův jev vykazují např. Fe, Co, Bi, Pt a Hg. Tyto kovy se liší od předchozí skupiny tím, že jejich chladné konce mají vyšší potenciál než horké konce. Pokud je na tyto kovy přiváděn elektrický proud ve směru od chladného konce k horkému, bude se uvolňovat Thomsonovo teplo. Pokud bude směr proudu opačný, teplo se spotřebuje (viz Obr. 4). [18], [19]

Thomsonův jev jako takový má uplatnění převážně v popisu termoelektrických vlastností materiálů. Peltierův i Seebeckův koeficient se vztahují vždy na dvojici materiálů, zatímco Thomsonův koeficient je vztažen pouze na jeden, což z něj dělá vhodnou veličinu pro stanovení jakési absolutní škály termoelektricity. Měření Thomsonova koeficientu ale komplikuje přítomnost Joulova tepla, které je až o dva řády vyšší než teplo vzniklé v důsledku Thomsonova jevu. [20]



Obr. 4: Pozitivní (a) a negativní (b) Thomsonův jev [21]

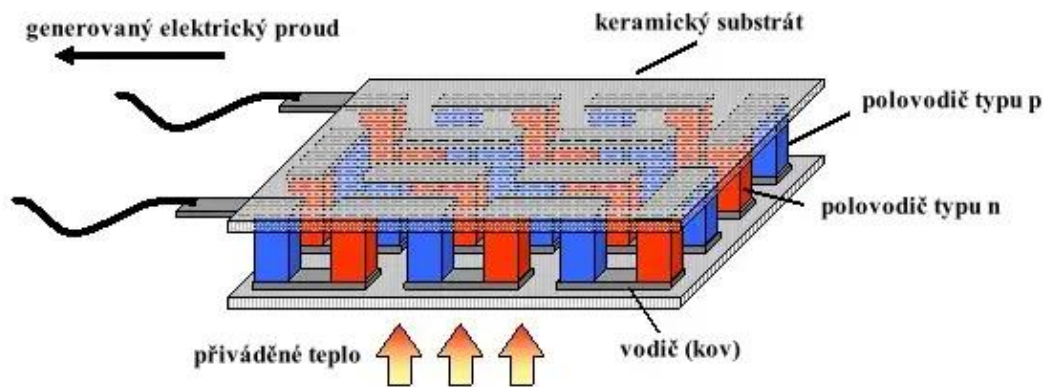
2.2 Význam a využití termoelektrických jevů v praxi

Hlavním využitím termoelektrických jevů jsou termočlánky, které tvoří základ mnoha běžně používaných zařízení. Termočlánek ve své podstatě není nic jiného než soubor již zmiňovaných jednoduchých obvodů tvořených dvěma spojenými vodiči. Můžeme tedy zařízení založená na termočláncích rozdělit na tři základní skupiny: zařízení jejichž cílem je produkce elektrické energie, zařízení, jejichž účelem je transport tepla a měřicí zařízení.

2.2.1 Termoelektrická zařízení sloužící jako zdroj elektrické energie

Skupinu zařízení, která převádí tepelnou energii na elektrickou na základě termoelektrických jevů lze obecně označit jako **termoelektrické generátory (TEG)**. Fungují na základě Seebeckova jevu (2.1.1), kde se jako vodivý materiál používají polovodiče – nejčastěji slitiny na bázi telluridu olovnatého či bismutitého a slitiny křemíku a germania. V současné době se TEG využívají jako zdroje elektrické energie jen velmi málo, ale neustále probíhající výzkumy na toto téma naznačují, že by se toto v budoucnu mohlo změnit. [23]

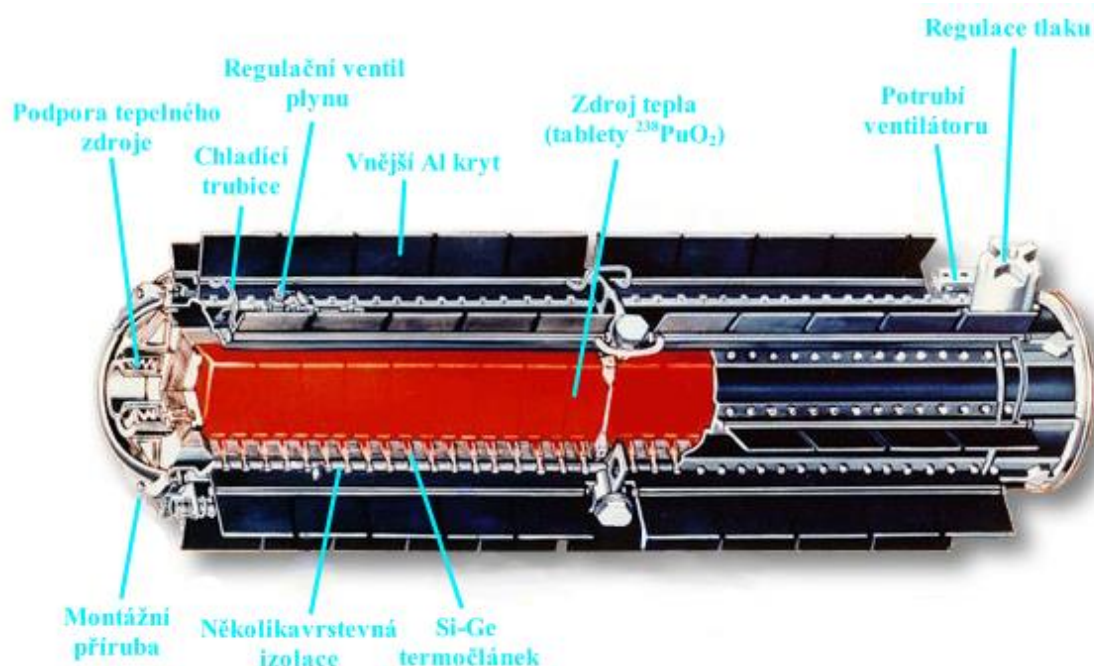
Základní jednotkou konstrukce TEG je termočlánek tvořený z dvojice polovodičů, kdy jeden je typu n a druhý typu p; jedná se o p-n přechod. Tyto termočlánky se pro zvýšení napětí zapojují do série, kde jsou mezi sebou propojeny kovem (nejčastěji Cu) pro lepší průchod nosičů náboje spojem. Vnější vrstva je poté tvořena izolantem (keramika), aby se co nejvíce bránilo ztrátám a pro zvýšení pevnosti. Takovýto segment se označuje jako **termoelektrický modul** (viz Obr. 5). TEG nejsou schopny generovat tak velká napětí jako jiné, běžně používané generátory, i přesto ale nachází využití např. jako nouzové zdroje elektrické energie. [24]



Obr. 5: Termoelektrický modul v režimu TEG [22]

Speciálním případem termoelektrického generátoru je **radioizotopický termoelektrický generátor** (dále jen RTG). Jak lze usoudit z názvu, ve fungování RTG hraje velkou roli přítomnost radioaktivních prvků, jejichž rozpad produkuje teplo potřebné pro uplatnění Seebeckova jevu. Zjednodušeně lze konstrukci RTG popsat jako trubici naplněnou radioaktivním palivem (nejčastěji tablety $^{238}\text{PuO}_2$), které je obklopeno materiálem s dobrou tepelnou vodivostí. Následuje vrstva polovodičových termočlánků, které jsou orientovány tak, aby jeden spoj byl vždy v kontaktu s teplotnějším materiálem a druhý s chladicí trubicí, čímž vzniká kýžený teplotní rozdíl. [26], [27]

Z konstrukce RTG vyplývá, že tento typ generátoru dokáže produkovat elektrickou energii dlouhodobě; jeho životnost závisí převážně na poločas rozpadu paliva. RTG neobsahuje žádné pohyblivé části, tudíž je tichý a dochází k minimálnímu mechanickému opotřebení. Kombinace minimálních nároků na údržbu a životnost i několik desítek let z RTG dělá ideální pohon pro vesmírné družice; byl použit i pro napájení všeobecně známého výzkumného vozítka Curiosity. Další možná uplatnění jsou v pohánění zařízení, která vyžadují nezávislý zdroj energie, např. meteorologické stanice či majáky. [26], [27]

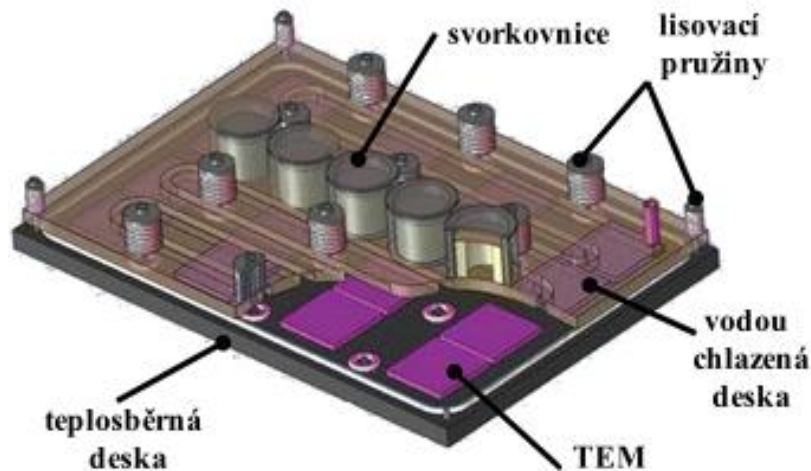


Obr. 6: Radioizotopový termoelektrický generátor (RTG) [25]

Využití odpadního tepla pomocí TEG

Velkou oblastí potenciálního využití TEG je „recyklace“ odpadního tepla, které v praxi doprovází veškeré tepelné i elektrické procesy. Velký potenciál má toto uplatnění především v průmyslových odvětvích, kde se pracuje s vysokými teplotami, např. ocelárny, cementárny, sklárny, ropné rafinerie, papírny a mnoho dalších; v těchto odvětvích je potřeba udržovat v pecích extrémně vysoké teploty, v důsledku čehož uniká obrovské množství odpadního tepla. TEG teoreticky umožňují toto teplo opětovně zužitkovat, proto se o něco takového již pokoušelo několik různých institucí po celém světě.

Jedním takovým pokusem byla např. soustava TEG ve východo-japonské ocelárně Keihin náležející společnosti JFE Steel v roce 2012. Jedna jednotka tohoto systému obsahuje celkem 16 termoelektrických modulů (dále jen TEM) z Bi-Te materiálů, z nichž každý produkuje 18 W při teplotním rozdílu cca 200 K. Horký konec je udržován pomocí měděné teplosběrné desky, která přijímá sálavé teplo z železných desek, chladný konec na druhé straně tvoří deska chlazená vodním proudem, taktéž z mědi. Mezi tyto desky jsou umístěny TEM a na celou soustavu je neustále vyvíjen tlak 1 MPa pomocí systému pružin. Těchto jednotek bylo v Keihinské ocelárně instalováno dohromady 56. Ve výsledku bylo dosaženo výstupu 9 kW při teplotě zdroje 1188 K, vzdálenosti systému od zdroje 2 m a šířce zdroje 1,7 m. [28]



Obr. 7: Uspořádání termoelektrického generátoru v Keihinské ocelárně [28]

Proběhly i studie na to, jak využít jako zdroj tepla pro TEG rotační pece v cementárnách. Na rozdíl od předchozího případu se zde objevuje problém s tvarem tepelného zdroje a jeho neustálým pohybem; v současné době je možné produkovat ve velkém množství pouze TEM tvaru kvádrů či krychlí, což by v případě rotační pece vedlo k nízké účinnosti TEG, protože by se velká část tepla sálajícího zdroje z geometrických důvodů nezachytila. Při instalaci TEG přímo na povrch pece by bylo možné tyto ztráty kompenzovat vyšším výkonem, ale to by vedlo ke zvýšení hmotnosti pece, a tudíž k vyšším energetickým nákladům na její provoz; zároveň by bylo potřeba pro instalaci pec dlouhodobě odstavit a povrch pece by mohl být poškozen. S možným řešením přišli v roce 2015 vědci z univerzity v čínském Wuhanu, kteří navrhli model sekundární vrstvy, která by v určité vzdálenosti od povrchu kopírovala rotační pec v celé délce. Na této vrstvě by byly rozmístěny TEG. Výsledky této studie ukázaly možnost přeměny více než 33 % odpadního tepla pece. Na tento výzkum navázala v roce 2019 i univerzita v dánském Aalborgu, která navrhla prstencový absorbér kolem místa pece s nejvyšší teplotou jako horký konec pro TEM, v současné době se ale stále jedná pouze o modely a počítačové simulace. [29], [30]

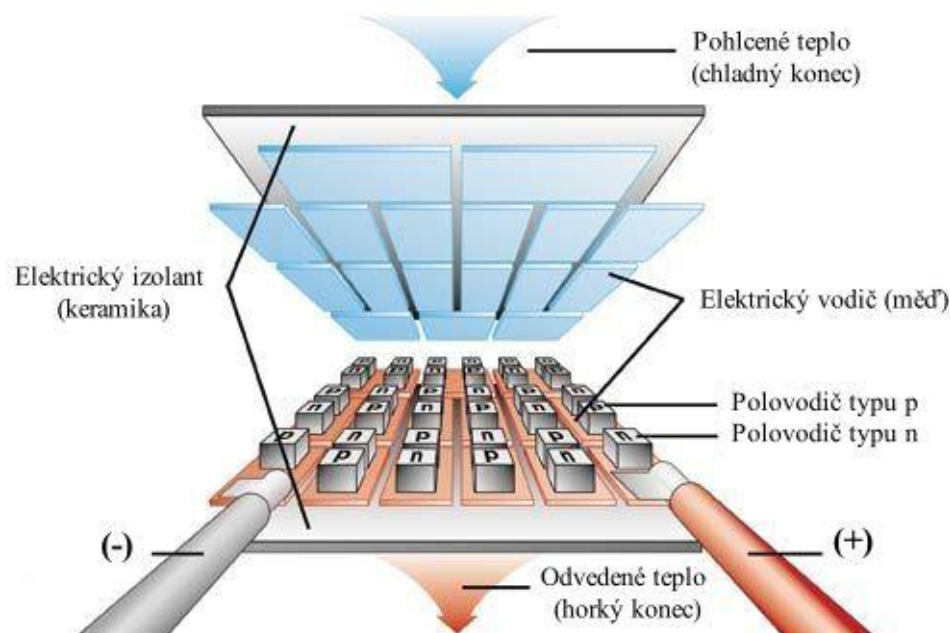
Jedno z potenciálních řešení podobných geometrických problémů v souvislosti s TEG vzešlo z Jižní Koreje roku 2016, kde Národní výzkumný institut v Ulsanu (UNIST) vyvinul TEG ve formě nátěrové hmoty; podobný výzkum v dubnu tohoto roku zveřejnil i švédský Královský institut Stockholm. V této formě lze pro sběr tepla využít celý povrch zdroje a není téměř žádné omezení na jeho geometrii, což umožňuje maximalizovat kontakt tepelného zdroje s TEG, a tudíž i získané napětí. V praktickém použití by ale nejspíš mohl nastat problém s logistikou chlazení. [32], [33]

Tyto případy ukazují, že TEG mohou mít uplatnění i ve velkém měřítku. Mnoho průmyslových odvětví produkuje taková množství odpadního tepla, že i konverze menších procent by mohla představovat velký rozdíl v energetické náročnosti mnoha procesů. V roce 2021 se v ČR vyrobilo 4,7 milionů tun surové oceli; za předpokladu, že na 1 tunu připadá cca 10 GJ odpadního tepla, se ho za den do atmosféry uvolní 129 TJ. V celém světě to za minulý rok bylo 1 951,9 milionů tun surové oceli, tudíž 53 477 TJ odpadního tepla za den pouze z oceláren. [28], [34]

Zužitkování odpadního tepla nejen z velkých výrobních procesů, které teplo aktivně využívají, ale i z dalších odvětví, která produkují velké množství tepla jako vedlejší produkt – např. velká datová centra, by mohlo mít zřetelný dopad jak na světovou energetiku, tak na životní prostředí, díky tomu, že TEG nevyžaduje k fungování palivo, tudíž sám o sobě pracuje bez emisí, které jsou v dnešní době předmětem mnoha diskuzí.

2.2.2 Termoelektrická zařízení sloužící pro transport tepla

Zařízení, která využívají Peltierova jevu (2.1.2) se nejčastěji využívají pro chlazení, tudíž byl zaveden pojem Peltierův chladič, nebo také termoelektrický chladič, angl. **thermoelectric cooler (TEC)**. V případě ohřevu se jedná o stejné zařízení, pouze s prohozenými konci, tudíž budeme používat pojem TEC obecně pro ohřevná i chladičí zařízení. Vzhledem ke vzájemnému vztahu Seebeckova a Peltierova jevu se TEG a TEC budou přirozeně svou konstrukcí velice podobat. Základní jednotkou TEC tedy bude opět TEM, jediným rozdílem zde bude směr tepelného toku, který závisí na směru proudu, který je do modulu přiváděn (viz Obr. 8).



Obr. 8: Termoelektrický modul v režimu TEC [31]

Z totožné konstrukce vyplývá, že TEC s sebou ponese stejné výhody jako TEG, tudíž žádné pohyblivé části, tichý provoz, dlouhou životnost a šetrnost k životnímu prostředí; mají zároveň ale jednu zásadní nevýhodu, kterou je již dříve zmíněná nízká účinnost. V chladicích zařízeních, která tvoří většinu TEC, představuje problém převážně Joulovo teplo (2.1.3); z toho důvodu je výhodnější TEC využívat přímo v kombinaci s TEG, kde lze přebytečné teplo rovnou přeměňovat zpět na elektrickou energii, která může být opětovně využívána pro chod TEC, čímž dochází k zásadnímu snížení energetických ztrát.

Příkladem možného praktického využití TEC je chlazení počítačových procesorů (CPU). V současné době se v běžných počítačích využívá chlazení vzduchem, s rostoucími nároky na rychlost a velikost CPU a dalších čipů a desek, které je nutno chladit, se ale předpokládá, že brzy nebude vzdušné chlazení dostatečné a bude se muset přejít k jiným metodám. Tímto se zabývali vědci z univerzity v tureckém Karabükü, kteří na 2. ročníku WCIT (World Conference on Information Technology) v roce 2012 představili svůj výzkum, který porovnává efektivitu běžného vzdušného chlazení, vodního chlazení a chlazení pomocí TEC.

Jejich měření bylo prováděno pro časový úsek 15 min, během kterých byl CPU zatížen na 100 % své kapacity. Použitý procesor byl Pentium 4 CPU 2.66 GHz, který už se od roku 2008 nevyrobí, každopádně pro účely porovnání chladicích metod jsou data jím poskytnutá stále relevantní. Pro vzdušné chlazení bylo naměřeno teplotní maximum 69 °C, což leží mimo operační rozsah použitého CPU (30-59 °C). Pro vodní chlazení bylo naměřeno maximum 42 °C. Problémem Peltierova chlazení jako takového, je přehřívání horkého konce, proto byl TEC v tomto experimentu kombinován s vodním chlazením, které odvádělo z horkého konce přebytečné teplo, zatímco chladný konec byl v kontaktu s CPU. Použitý modul TEC1 – 12709 snížil teplotu CPU na stabilních 38 °C. [35]

Kromě malých součástek lze TEC využít i ve velkém měřítku, konkrétně v budovách. Za pomoci např. fotovoltaiky by bylo možné v létě použít TEC pro transport tepla z budovy ven; zároveň by se teplo z horkého konce dalo využít např. pro ohřev vody. V zimě by se naopak změnil směr proudu a teplo by proudilo do budovy. Tato myšlenka již byla podrobena mnoha pokusům, výpočtům a modelům; v praxi se podařilo v modelovém domě dosáhnout rozdílu 16 °C mezi teplotami vně a uvnitř budovy. Momentálně tyto systémy nedosahují dostatečných výkonů v porovnání s běžně používanými technologiemi, tudíž probíhají snahy o nalezení účinnějších materiálů pro konstrukci TEM. Zároveň se neustále hledá nejvýhodnější systém tepelných výměníků a celková geometrie uspořádání, pro dosažení nejvyšší možné účinnosti. [36]

Z těchto příkladů vyplývá, že TEC jsou díky svému tichému chodu, malým rozměrům a nízké hmotnosti silnými kandidáty jak na základ budoucích chladicích systémů pro malé elektronické součástky, tak na nahrazení současných topných a chladicích systémů v domácnostech. Problémem ale zůstává vysoká teplota horkého konce, ze kterého je nutno teplo transportovat mimo zařízení pomocí tepelných výměníků. V současné době jsou TEC hojně využívány převážně jako malé chladničky, např. v hotelových pokojích, v cestovních přívěsech, v minibarech apod.

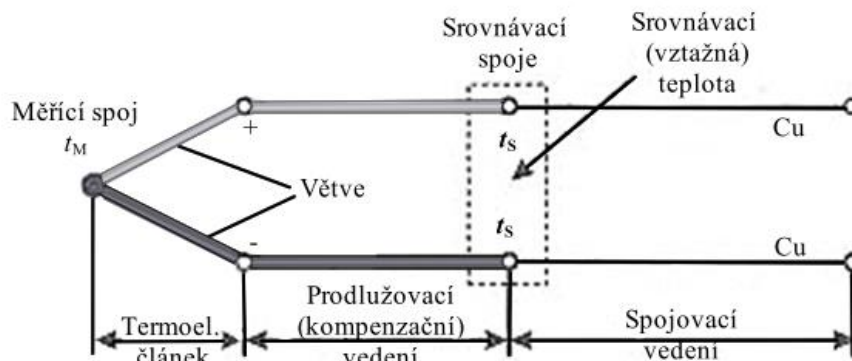
2.2.3 Termoelektrická měřicí zařízení

Termočlánky jsou pravděpodobně nejznámější ve spojitosti s jejich uplatněním v měření teploty. Díky rozdílným vlastnostem různých dvojic vodičů lze správnou volbou materiálu zvolit žádaný rozsah a oblast přesnosti termočlánku, proto jsou k nalezení nejen v téměř každém běžně dostupném digitálním teploměru na světě, ale také v nejrůznějších průmyslových odvětvích, kde jsou využívány např. pro měření teploty odlitků ve slévárenství,

pro měření teploty roztavených polymerů v extrudérech či pro kontrolu teploty během procesů v potravinářském průmyslu. [37], [38]

Principem fungování termočlánekového teploměru je opět Seebeckův jev (2.1.2). Jeden z konců termočlátku je v tomto případě neustále udržován na konstantní teplotě pomocí kompenzačního obvodu či termostatu (srovnávací spoj), zatímco druhý je vystavován okolí (měřicí spoj) (viz Obr. 9). Výstupem tohoto uspořádání je naměřené termoelektrické napětí, které obsahuje informaci o teplotním rozdílu. [47]

Na rozdíl od TEG a TEC, ve kterých byly preferovaným materiálem polovodiče, jsou v teplotních měřidlech používány převážně dvojice kovů. Nejpoužívanější dvojice jsou normované a uvedené níže (viz Tabulka 2)



Obr. 9: Schéma termočlátku pro měření teploty [37]

Tabulka 2: Typy používaných termočláneků [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46]

| Typ | Přibližný pracovní rozsah (°C) | Složení větví |
|-----|--------------------------------|---|
| K | -270–1260 | Chromel (+) Alumel (-) |
| T | -270–370 | Měď (+) Konstantan (-) |
| E | -250–900 | Chromel (+) Konstantan (-) |
| J | -200–750 | Železo (+) Konstantan (-) |
| N | -270–1260 | Nicrosil (+) Nisil (-) |
| R | -50–1480 | Platina-rhodium (13 %) (+) Platina (-) |
| B | 0–1700 | Platina-rhodium (30 %) (+) Platina-rhodium (6 %) (-) |
| S | -50–1480 | Platina-rhodium (10 %) (+) Platina (-) |
| M | 0–1400 | Nikl-molybden (18 %) (+) Nikl-kobalt (0,8 %) (-) |

| Typ | Přibližný pracovní rozsah (°C) | Složení větví |
|-----|--------------------------------|---|
| P | 0–1260 | (55 %) palladium-platina-zlato (14 %) (+) Zlato-palladium (35 %) (-) |
| C | 0–2300 | Wolfram-rhenium (5 %) (+) Wolfram-rhenium (26 %) (-) |
| D | 0–2300 | Wolfram-rhenium (3 %) (+) Wolfram-rhenium (25 %) (-) |
| G | 0–2300 | Wolfram (+) Wolfram-rhenium (26 %) (-) |

2.3 Alkalicky aktivované hlinitokřemičitany

Jak bylo avizováno v úvodu, tato práce je zaměřena na termoelektrické vlastnosti vybraných směsí **alkalicky aktivovaných hlinitokřemičitanů (AAA)**. V této kapitole se tedy přesuneme od termoelektrického jevu jako takového a zaměříme se již konkrétněji na tyto materiály a jim podobné, jejichž termoelektrické vlastnosti se v současné době zkoumají pro možná praktická využití. Vzhledem k povaze a rozsahu práce se budeme zaměřovat převážně na materiály využitelné ve stavebnictví.

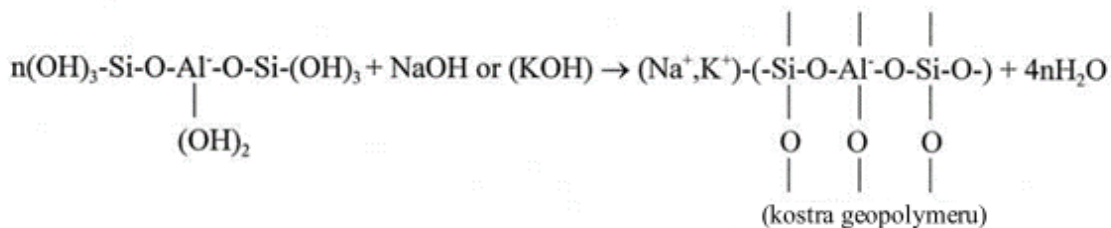
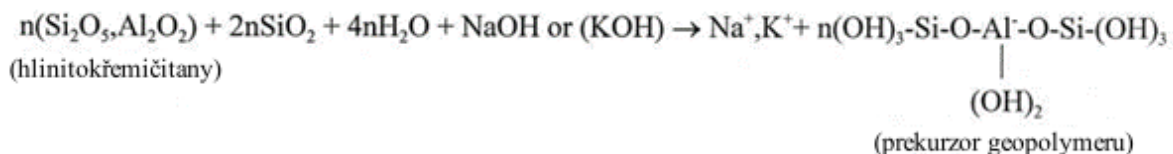
Zasadíme si tedy krátce tyto materiály do kontextu současného stavebnictví. V předchozích kapitolách již jsme se stručně dotkli pokusů o využití odpadního tepla z rotačních pecí. Přestože se všechna navrhovaná řešení lišila způsobem provedení, hlavní myšlenka byla vždy podobná; využít odpadní teplo z pece pomocí instalace TEG do nějaké specifické vzdálenosti od jejího povrchu. Přestože tento přístup by nejspíše byl schopen do jisté míry snížit negativní dopad na životní prostředí a snížit energetickou náročnost výrobního procesu cementu, cement jako takový příliš ekologickým materiálem není. V současné době je výroba **portlandského cementu (PC)** doprovázena emisí obrovského množství CO_2 , který se uvolňuje jak při vypalovacím procesu z CaCO_3 za vzniku slínku, tak při spalování uhlí či plynu na výhřev pece. Zatímco vyhřívání pece má možnost své emise snižovat v závislosti na zvoleném zdroji tepla, množství CO_2 uvolněného rozkladem CaCO_3 se nijak regulovat nedá; jednoduchým výpočtem z chemické rovnice se tedy dostaneme k tomu, že v případě 100% čistoty se při úplném rozkladu CaCO_3 uvolní cca 440 kg CO_2 z 1 tuny CaCO_3 . [49], [50]

Nabízí se zde tudíž několik alternativních řešení. Jak bylo zmiňováno výše (2.2.2), probíhají snahy o zabudování TEM do stěn budov. Takové uspořádání by pravděpodobně umožňovalo efektivnější využití odpadního tepla, což by vedlo ke snížení emisí ze spalování uhlí či plynu, ale CO_2 z CaCO_3 by zůstal nezměněn. Přecházíme tedy k poněkud radikálnějšímu řešení, kterým je nahrazení portlandského cementu jinými materiály s podobnými vlastnostmi, ale ekologicky přijatelnějším procesem výroby. V současné době se právě pro tyto účely výzkum zaměřuje převážně na AAA, kterými se dále zabývá i tato práce.

2.3.1 Alkalická aktivace a obecné složení AAA

Obecně se složení AAA dá popsat jako alkalický aktivátor a hlinitokřemičitanový prekurzor, které vzájemně reagují v procesu, který se nazývá **alkalická aktivace**, nebo také **geopolymerizace**. Jedná se o dvoustupňovou polykondenzační reakci, při které se hlinitokřemičitanové tetraedry s přebytkem záporného náboje (AlO_2^-) rozpouští v silné bázi, kde se náboj kompenzuje kladnými protiionty (K^+ , Na^+) za vzniku anorganické polymerní

sítě, která v materiálu slouží jako pojivo; označuje se jako N-A-S-H či K-A-S-H gel v závislosti na přítomném protiiontu. [51], [52], [53]



Obr. 10: Geopolymerizační reakce [48]

Jako aktivátory je nutno použít velmi silné báze; proto se nejčastěji používá roztok NaOH či KOH společně s vodním sklem ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$). Jako hlinitokřemičitanový prekurzor potom může sloužit jakákoliv látka s dostatečným množstvím Al_2O_3 a SiO_2 ve své struktuře; vlastnosti výsledného gelu se potom budou lišit v závislosti na struktuře použitého prekurzoru. Mezi časté prekurzory se řadí např. granulovaná struska, která vzniká jako vedlejší produkt při výrobě železa ve vysoké peci, popílek ze spalování fosilních paliv, metakaolin, vyráběný jako příměs do betonů, mikrosilika z hutnických provozů a cihelný prach. [51], [52], [53]

2.3.2 Současný stav zkoumané problematiky

Abychom byli schopni nalézt spojitost mezi termoelektrickými jevy a potenciální náhradou cementu formou alkalicky aktivovaných hlinitokřemičitanů, je potřeba si v první řadě krátce uvést portlandský cement v kontextu tepelných a elektrických vlastností. Začneme tedy elektrickými vlastnostmi.

PC jako takový je možno prakticky považovat za elektrický izolant. Zatímco se v mnoha případech jedná o vlastnost žádoucí, s rozvojem chytrých technologií se objevuje stále více požadavků na elektricky vodivé stavební materiály. V posledních letech této vlastnosti bylo dosahováno především přidávkou vodivých příměsí do cementových matic, konkrétně se jedná o **uhlíkové příměsi** ve formě sazí, grafitového prášku, vláken, nanovláken, a **nanotrubiček (CNT)**. Takto vylepšené matrice jsou základem např. pro tzv. samocitlivé materiály, které jsou schopny pomocí změny elektrického odporu své vodivé složky zaznamenat vlastní deformaci, čímž umožňují sledování stavu staveb a včasnou identifikaci problémů způsobených např. únavou materiálu. Dalším použitím vodivých cementů jsou tzv. samoohřevové systémy, které umožňují např. odmrazování cest bez použití posypových solí na základě Jouleova tepla (2.1.3). [54], [55], [56], [57]

Tepelná vodivost čistého PC je také poměrně nízká, tudíž má PC tendenci teplo zadržovat a přispívat k tzv. jevu městského tepelného ostrova (angl. Urban Heat Island Effect – UHI effect), který je hlavním viníkem zvýšených teplot v zastavěných oblastech. Zároveň je tato vlastnost ale žádoucí v obytných budovách, kde snižuje energetické náklady na vytápění. Proto je důležité mít k dispozici širokou škálu stavebních materiálů s různými tepelnými

vlastnostmi, konkrétně měrnou tepelnou kapacitou (c) a součinitelem tepelné vodivosti (λ), ale s nezměněnými mechanickými vlastnostmi. Tyto požadavky přirozeně vedly k různým modifikacím portlandského cementu za účelem dosažení kýžených tepelných vlastností. Ramazan Demirboğa ve svém článku „*Thermal conductivity and compressive strength of concrete incorporation with mineral admixtures*“ [61] zmiňuje tři hlavní faktory, kterými lze měnit koeficient λ portlandského cementu. Prvně se jedná o mineralogické složení; agregáty, což je uskupení minerálů, které je důsledkem růstu mnoha krystalů v omezeném prostoru [62], s vyšším koeficientem λ dají ve výsledku materiál s vyšším koeficientem λ a naopak. Dále záleží na krystalinitě agregátu; **minerály s vyšším stupněm pravidelnosti vykazují vyšší koeficient λ než amorfni agregáty stejného složení.** V druhé řadě záleží na množství vlhkosti vázané v materiálu a na jeho porézním charakteru.[58], [59], [60]

Vlastnosti portlandského cementu (PC) je tedy v současné době možno modifikovat pro konkrétní účely, problémem ale zůstává uhlíková stopa výrobního procesu a UHI. Tímto se dostáváme zpět k předmětu této práce; k alkalicky aktivovaným hliníkokřemičitanům. Z výše zmíněného složení (2.3.1) vyplývá, že se pro výrobu AAA dají využít suroviny, které jsou obecně, až na pár výjimek, považovány za odpadní, což se odráží i na jejich, v porovnání s PC nízké, ceně. Z tohoto důvodu, společně s jejich ekologickým potenciálem a vlastnostem podobným PC, se jedná o látky pro výzkum v oblasti stavebnictví velice atraktivní. [57], [58]

Vraťme se tedy k souvislosti s termoelektrickými jevy. **AAA, na rozdíl od PC, vykazují jistou elektrickou vodivost i bez uhlíkových příměsí,** pravděpodobně v důsledku **přítomnosti pohyblivých iontů, které jsou částečně disociovány ve vodě.** Toto naznačuje výskyt termoelektrických jevů, jejichž rozsah je předmětem experimentální části. Přídavkem vodivých příměsí lze poté dosáhnout i elektronové vodivosti, ve výsledku je potom možné pozorovat vyšší elektrické vodivosti než v případě PC. Literatura [63], [64] říká, že termoelektrické vlastnosti vykazuje i PC s příměsí uhlíkových nanočástic, ale je výhodnější zaměřit se v tomto ohledu spíše na AAA, jelikož hlavním účelem zkoumání termoelektrických vlastností stavebních hmot je tzv. „sběr energie“ (**energy harvesting**), který již byl zmiňován výše (2.2.1) v podobě využívání odpadního tepla prostřednictvím termoelektrického generátoru (TEG). Z důvodu povahy výrobního procesu PC by jeho termoelektrické vlastnosti nejspíše nebyly schopny dostatečně kompenzovat ekologické dopady výroby, tudíž jsou AAA pro tento účel vhodnějšími kandidáty. Princip „energy harvesting“ pomocí AAA je ve své podstatě obdobou TEG, ale v tomto případě by nebylo zapotřebí instalovat tradiční termoelektrický modul (TEM); jako TEM by sloužil přímo materiál samotný, což by umožňovalo jak úspornější používání elektrické energie, tak potlačení jevu UHI. Podívejme se tedy na dosavadní pokrok v této oblasti. [65]

V současné době ještě nebylo publikováno mnoho studií, které by byly zaměřeny konkrétně na termoelektrické vlastnosti AAA. Jedni z mála, kdo se touto problematikou již ve své publikaci zabývali, jsou Tan Jiawei, Li Xiaopeng a Cai Jingming z Jihovýchodní univerzity v čínském Nanjingu. Jejich článek z roku 2020 pojednává o termoelektrických vlastnostech geopolymérů s popílkovým a metakaolinovým prekurzorem. Ve výsledku bylo zjištěno, že Seebeckův koeficient těchto materiálů nabývá zásadně vyšších hodnot než v případě běžného cementu a jeho hodnota se zvyšuje s koncentrací báze.[66]

V roce 2021 Li Xiaopeng a Cai Jingming svůj výzkum rozšířili na metakaolinové a popílkové geopolymery s příměsí práškového nano-karbidu křemíku (SiC). Tato studie prokázala, že se tyto geopolymery chovají jako polovodiče typu n a jejich Seebeckův koeficient se zvyšuje jak s koncentrací SiC, tak s koncentrací aktivátoru. Teplota vytvrzování měla na metakaolinové geopolymery vliv zanedbatelný, zatímco vzorky popílkových geopolymérů na ni citlivost vykazovaly. [67]

AAA jsou poměrně novými materiály, tudíž jsou stále podrobovány pokusům jak v oblasti mechanických vlastností, tak v oblasti vlastností chemických, elektrických, tepelných nebo v našem případě, termoelektrických. Zatímco vlastnosti cementu byly v posledních letech zkoumány a upravovány hojně po celém světě, výzkum v oblasti AAA je stále v začátcích, a přestože již bylo mnoho zjištěno, stále existuje množství nejasností a mezer, které je zapotřebí vyplnit, než bude možné tyto materiály používat ve větší míře a využívat jejich plného potenciálu.

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Popis vzorků

Celkově bylo změřeno jedenáct vzorků geopolymérů o různých koncentracích vodivé příměsi; dva vzorky alkalicky aktivované strusky s příměsí grafitového prášku (GP), čtyři vzorky alkalicky aktivované strusky s příměsí uhlíkových sazí (CB), tři vzorky geopolyméru na bázi metalupku (MGP) a dva referenční vzorky strusky aktivované vodním sklem kompletně bez vodivé příměsi. Rozměry všech měřených vzorků byly zhruba (2 cm × 4 cm × 4 cm), přesné rozměry a hmotnosti jednotlivých vzorků jsou k dispozici v následující tabulce.

Tabulka 3: Základní charakteristika měřených vzorků

| Označení vzorku | <i>m</i> (g) | <i>h</i> (mm) | <i>s</i> (mm) | <i>d</i> (mm) | <i>V</i> ·10 ⁵ (m ³) | <i>ρ_h</i> (kg/m ³) |
|-----------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---|---|
| GP 9 % B | 71 | 22 | 38 | 41 | 3,35 | 2118 |
| GP 20 % B | 57 | 18 | 38 | 39 | 2,74 | 2073 |
| CB 3 % | 62 | 20 | 40 | 40 | 3,20 | 1950 |
| CB 4 % | 56 | 19 | 39 | 40 | 2,90 | 1939 |
| CB-1-4,44 % B | 60 | 19 | 40 | 39 | 2,93 | 2033 |
| CB-1-0,89 % B | 64 | 20 | 39 | 39 | 2,96 | 2142 |
| REF A 150 | 68 | 21 | 39 | 38 | 3,11 | 2169 |
| REF 2 | 62 | 19 | 38 | 39 | 2,79 | 2220 |
| MGP 6 % | 53 | 20 | 40 | 40 | 3,14 | 1686 |
| MGP 7 % | 50 | 20 | 40 | 40 | 3,18 | 1561 |
| MGP 8 % | 46 | 20 | 40 | 39 | 3,12 | 1487 |

GP = AAS (alkalicky aktivovaná struska) s grafitovým práškem (graphite powder)

CB = AAS s uhlíkovými sazemi (carbon black)

REF = referenční vzorek AAS bez vodivé příměsi

MGP = geopolymér na bázi metalupku

% udávají obsah vodivé příměsi, ostatní čísla a písmena slouží pouze jako identifikátory

Složení použitých geopolymérů se v rámci stejné řady liší pouze množstvím vodivé fáze v suspenzi; mezi jednotlivými řadami jsou rozdíly i v celkovém složení. Konkrétní složení jednotlivých geopolymérů je obsaženo v následujících tabulkách.

Tabulka 4: Složení geopolymérů MGP

| Složka | Množství |
|------------------------------|----------|
| prekurzor (g) | 600 |
| aktivátor (K vodní sklo) (g) | 235 |
| aktivátor (KOH) (g) | 26 |
| superplastifikátor (g) | 12 |
| písek PG1 (g) | 750 |
| písek PG2 (g) | 376 |
| písek PG3 (g) | 500 |
| suspenze (%) | 30 |

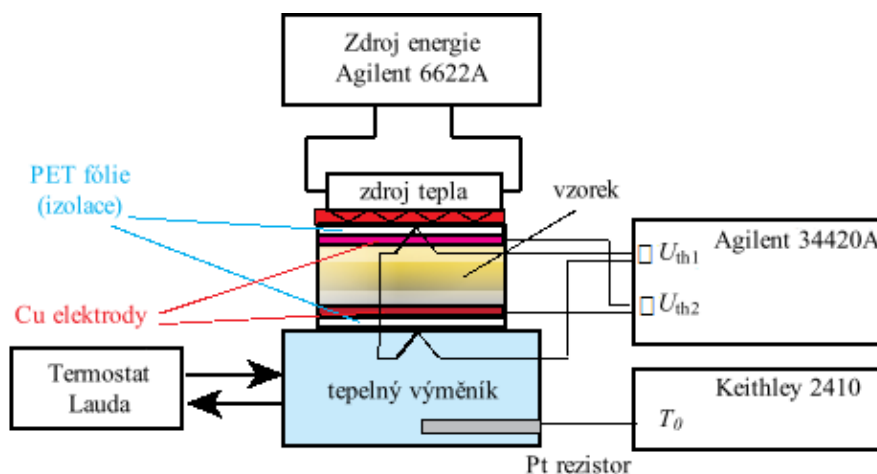
Tabulka 5: Složení suspenze v geopolymerech MGP6, MGP7 a MGP8

| Geopolymer | Suspenze (g) | Vodivá fáze (g) | Voda (g) |
|------------|--------------|-----------------|----------|
| MGP6 | 445,0 | 133,50 | 311,50 |
| MGP7 | 519,5 | 155,85 | 363,65 |
| MGP8 | 593,5 | 178,05 | 415,45 |

3.2 Měření termoelektrického napětí

3.2.1 Uspořádání experimentu

Před samotným měřením byly vzorky opatřeny měděnou páskou, která pro účely měření sloužila jako Cu elektrody. Elektrody byly dále opatřeny senzory – termočlánky typu K a následně odizolovány od okolí PET fólií, na kterou byly shora a zdola umístěny další termočlánky typu K. Shora byl poté umístěn zdroj tepla, kterým byl v tomto případě rezistor a zdola byla termostatem Lauda udržována referenční teplota cca 25 °C (viz Obr. 11). Jako zdroj stejnosměrného elektrického proudu byl použit přístroj Power Supply Agilent 6622A a napětí byla měřena nanovoltmetrem Agilent 34420A. Z rozdílu napětí byl poté pomocí kalibračních křivek stanoven rozdíl teplot mezi měřenými stranami vzorku. Pro měření odporu byl použit SourceMeter Keithley 2410, z něhož byla pomocí kalibrační křivky následovně zjišťována přesná referenční teplota. Aparatura byla během měření umístěna v izolační komoře pro omezení vlivu proudění vzduchu.

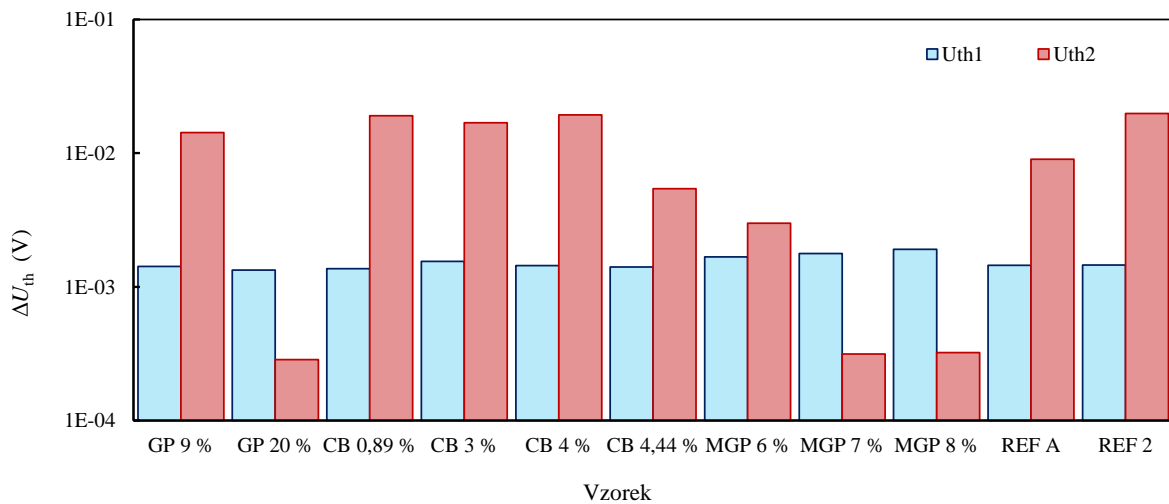


Obr. 11: Aparatura pro měření termoelektrického napětí

Měření každého vzorku bylo prováděno v pěti nepřetržitých cyklech ohřev/chlazení, kde každý proces probíhal po dobu dvou hodin a data byla zaznamenávána v šestivteřinových intervalech. Veškerý ohřev byl prováděn za konstantního výkonu 4,2 W.

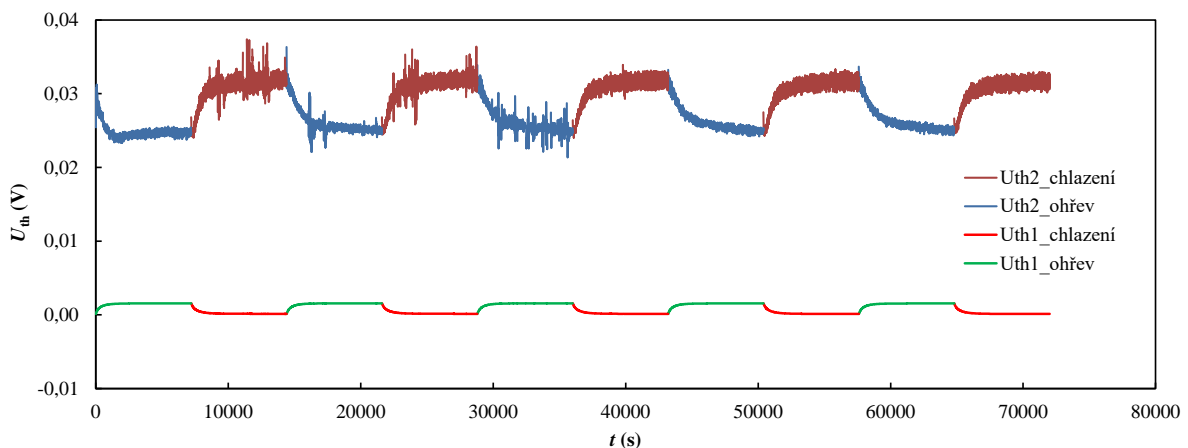
3.2.2 Výsledky a diskuze

V následujícím grafu je znázorněno porovnání jednotlivých vzorků z hlediska vygenerovaného termoelektrického napětí. Nejvyšších hodnot bylo dosaženo u vzorků s nízkou koncentrací příměsí, převážně se jedná o řadu s uhlíkovými sazemi (CB). Podobných hodnot dosahovaly i referenční vzorky REF A a REF 2, které žádné vodivé příměsi neobsahují. Naopak nejhorších výsledků bylo dosaženo u vzorků s vyšším obsahem příměsí grafitového prášku, konkrétně GP 20 %, MGP 7 % a MGP 8 %, kde napětí vygenerované materiálem nedosáhlo ani hodnot napětí mezi elektrodami.



Obr. 12: Porovnání napětí generovaného mezi elektrodami (U_{th1}) a napětí generovaného vzorkem (U_{th2}) mezi jednotlivými měřenými vzorky

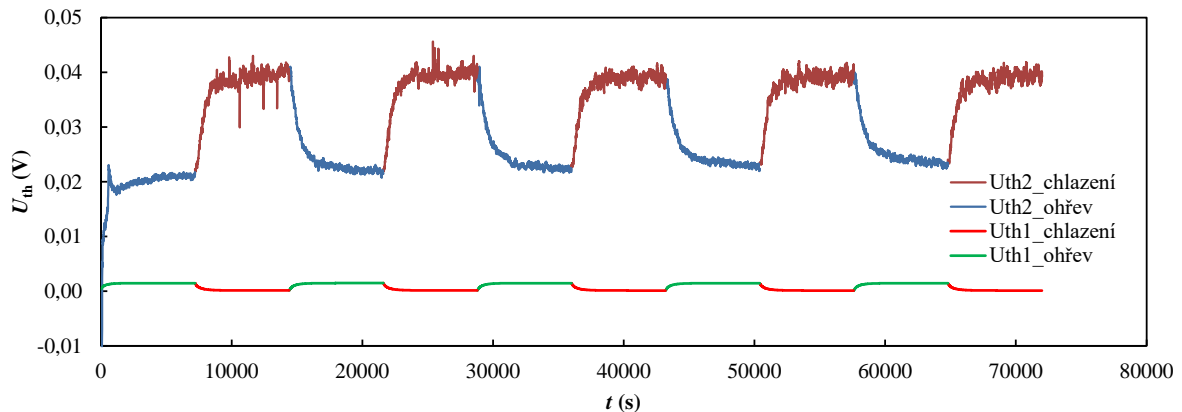
Zaměříme se tedy nejprve na vzorky, které neobsahují vodivou příměs žádnou – referenční vzorky REF A a REF 2. V předchozím grafu lze pozorovat, že napětí vygenerované těmito vzorky přesáhlo napětí na elektrodách o více než jeden řád, tudíž lze vzorky považovat za termoelektrické generátory. Průběh experimentu pro vzorek REF A je znázorněn v následujícím grafu.



Obr. 13: Graf napětí v závislosti na délce experimentu pro referenční vzorek REF A; U_{th1} značí napětí na elektrodách a U_{th2} označuje vygenerované termoelektrické napětí v materiálu

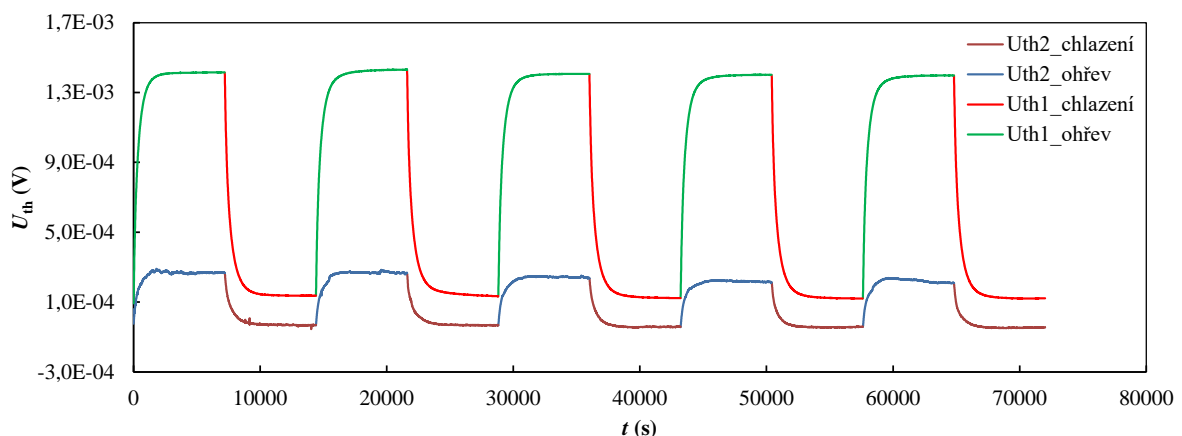
Jak již bylo zmíněno výše, AAA na rozdíl od portlandského cementu vykazuje elektrickou vodivost i bez vodivých příměsí vlivem částečně disociovaných iontů (viz 2.3.2), což vyplývá z obecné struktury geopolymery (viz Obr. 10). Průběh experimentu pro vzorek REF A toto

tvrzení potvrzuje svým chováním v souvislosti s ohřevem/chlazením, kdy během ohřevu vzorek generoval menší termoelektrické napětí než během chlazení, tudíž byl náboj nejspíše přenášen disociovanými kationty aktivátoru a vyskytovala se zde tedy **polarizace**. Podobné chování vykazovaly i vzorky s nízkou koncentrací vodivé příměsi, příkladem je vzorek CB 0,89 %, jehož experimentální průběh je obsažen v následujícím grafu.



Obr. 14: Graf napětí v závislosti na délce experimentu pro vzorek CB 0,89 %; U_{th1} značí napětí na elektrodách a U_{th2} označuje vygenerované termoelektrické napětí v materiálu

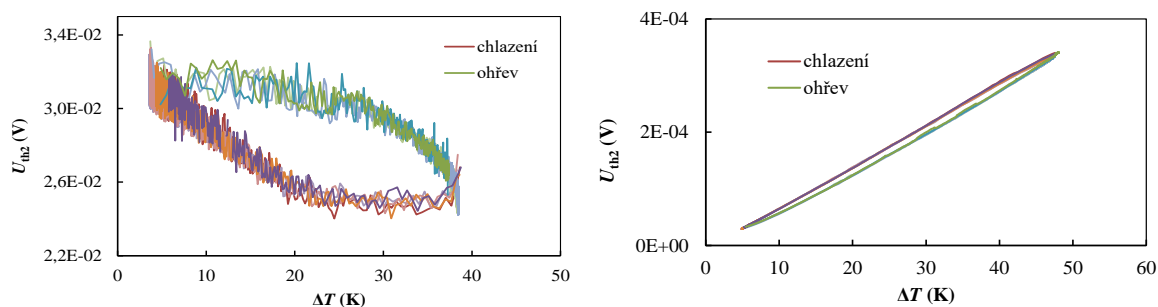
Vyššího termoelektrického napětí tedy bylo dosaženo ve vzorcích, kde byly primárním typem nosiče náboje ionty. S výrazným zvýšením koncentrace příměsi se potom stávají primárním nosičem náboje elektrony a generované termoelektrické napětí se snižuje – v našem případě kleslo o více než řád; tento jev je zřetelný zejména ve vzorcích řady GP a MGP, kde se vzorky s nejvyšším obsahem příměsi velikostí vygenerovaného napětí nevyrovnaly ani napětí na elektrodách. Příkladem je vzorek GP 20 % v následujícím grafu.



Obr. 15: Graf napětí v závislosti na délce experimentu pro vzorek GP 20 %; U_{th1} značí napětí na elektrodách a U_{th2} označuje vygenerované termoelektrické napětí v materiálu

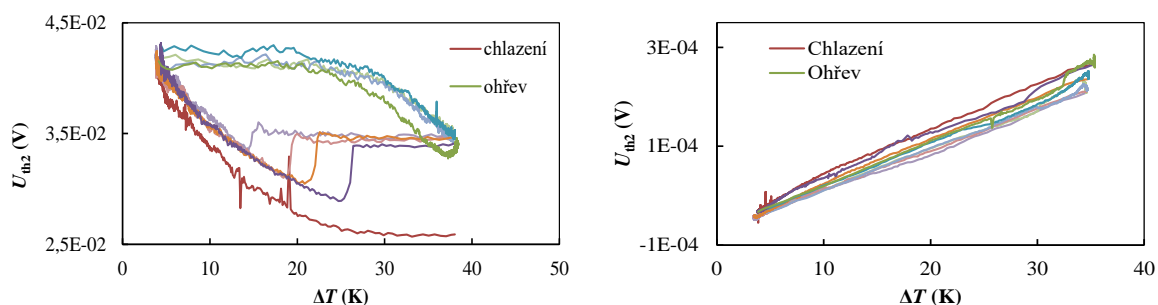
V obr. 12 lze ale pozorovat, že generované napětí v závislosti na obsahu příměsi neklesá lineárně, ale skokově. Příkladem jsou vzorky CB řady, kde se mezi sebou vzorky CB 0,89 %, CB 3 % a CB 4 % ve velikosti generovaného napětí výrazně neliší, zatímco ve vzorku CB 4,44 % je znát mírný pokles. Výraznější je tento jev v řadě MGP, kde se v případě vzorku MGP 7 % projevuje vůči MGP 6 % výrazný pokles v generovaném napětí, zatímco MGP 7 % a MGP 8 % vůči sobě téměř žádný rozdíl nevykazují. Tato skutečnost napovídá existenci **perkolačního prahu**, jehož překročení vede k propojení elektrod částicemi vodivé příměsi a ze vzorku se skokem stává vodič.

Tato skutečnost je patrná i ze závislosti vygenerovaného termoelektrického napětí na teplotním rozdílu měřených protilehlých stran vzorku (viz Obr. 16).



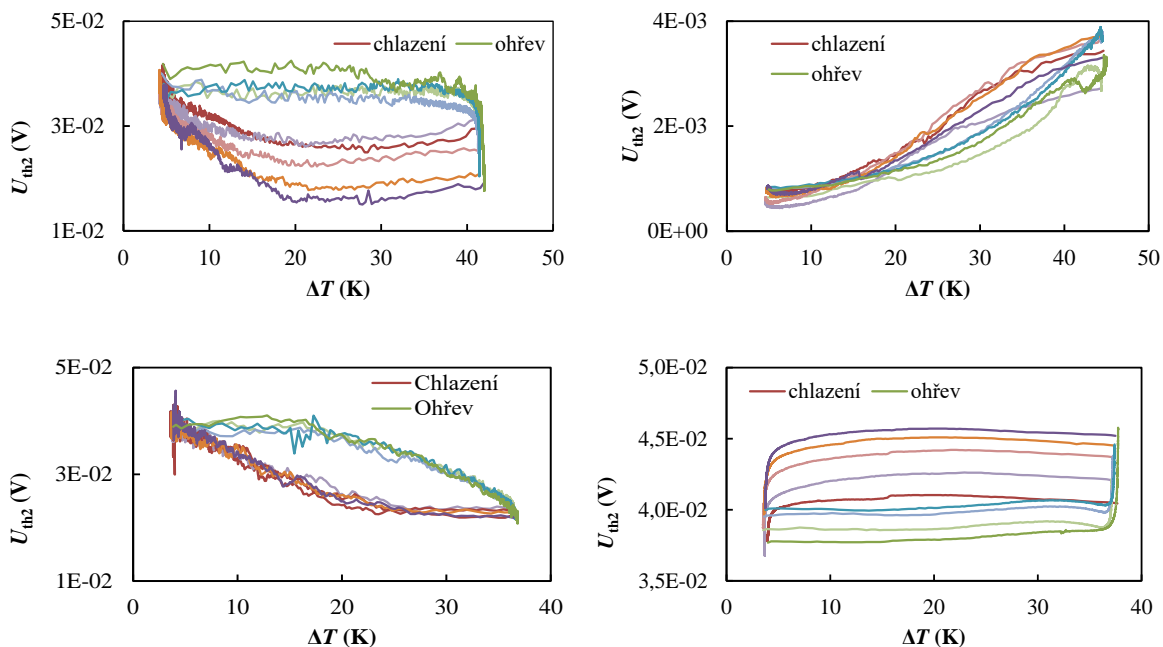
Obr. 16: Závislost vygenerovaného termoelektrického napětí na rozdílu teplot pro vzorek MGP 7 % (vpravo) a pro referenční vzorek REF A (vlevo)

Vzorek MGP 7 % je v tomto případě příkladem vodivého vzorku; perkolační práh byl tedy již překročen. Referenční vzorek REF A je naopak příkladem vzorku, kde jsou nosičem náboje výhradně ionty a k propojení elektrod vodivou fází nedochází. Opět lze pozorovat rozdíl v orientaci, kde vodivý vzorek MGP 7 % s rostoucím teplotním rozdílem generuje vyšší termoelektrické napětí, zatímco referenční vzorek generuje vyšší napětí s klesajícím rozdílem teplot. Dále lze výše pozorovat vznik **hysterezní smyčky** mezi procesem ohřevu a chlazení v důsledku relaxačních procesů. V rámci měření obecně platil trend, že větší plocha hysterezní smyčky odpovídala vyššímu generovanému napětí. Jednotlivé vzorky však poskytly různé tvary křivek, a tudíž i hysterezních smyček, a to i v rámci stejné řady. Příkladem jsou následující grafy náležející vzorkům řady GP.



Obr. 17: Závislost vygenerovaného termoelektrického napětí na rozdílu teplot pro vzorek GP 20 % (vpravo) a pro vzorek GP 9 % (vlevo)

Zde lze pozorovat, že v případě vzorku GP 20 % se hystereze téměř nevyskytuje, zatímco vzorek GP 9 % vykazuje hysterezi značnou. Tento vzorek také ukazuje, že s každým opakováním ohřívacího cyklu se hysterezní smyčka zmenšovala a měření potvrdilo, že s každým dalším cyklem bylo vygenerované nižší napětí. Tím se dále potvrzuje tvrzení, že větší plocha hysterezní smyčky odpovídá vyššímu vygenerovanému termoelektrickému napětí. Za zmínku stojí taktéž tvar této smyčky ze strany chlazení, kde dochází k odchylce od očekávaného tvaru. Tato deformace se opakovala ve všech měřeních vzorku GP 9 % a její velikost se snižovala s časem, tudíž s opakováním cyklu a se snižováním vygenerovaného napětí. Tato deformace nebyla pozorována v žádném dalším měřeném vzorku.



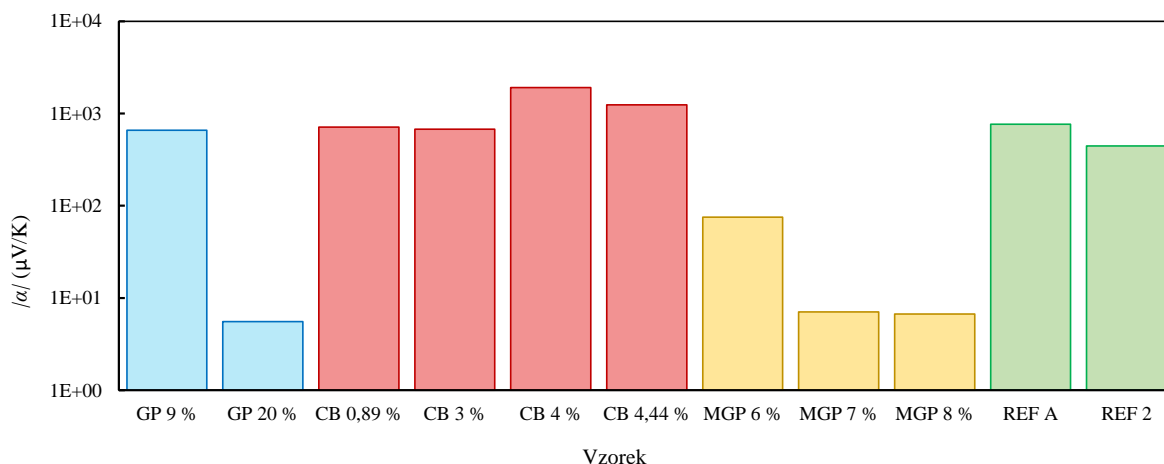
Obr. 18: Závislost vygenerovaného napětí na rozdílu teplot pro vzorek CB 3 % (vlevo nahoře), vzorek MGP 6 % (vpravo nahoře), vzorek CB 4,44 % (vpravo dole) a vzorek CB 0,89 % (vlevo dole)

Výše jsou uvedeny grafy čtyř dalších vzorků. Vzorek CB 0,89 % se zde jeví téměř identicky jako referenční vzorek REF A (viz Obr. 16), zatímco vzorek CB 3 % má sice průběh podobný, ale na rozdíl od vzorků REF A a CB 0,89 % byla v tomto případě velikost vygenerovaného napětí viditelně ovlivněna opakovaným ohřevem vzorků – s každým opakováním měření byly hodnoty napětí nižší. Vzorek MGP 6 % je již spíše vodivý, ale stále ještě vykazuje jistou míru hysterese, což se odráží i v hodnotách termoelektrického napětí, které ze své řady vygeneroval nejvyšší. Zvláštním případem je vzorek CB 4,44 %, kde též převládá elektronová vodivost, ale vygenerované napětí se řádově pohybuje spíše v oblasti vzorků, kde jsou primárními nosiči náboje ionty. Tvar křivek tohoto vzorku se také liší od ostatních měřených vzorků (viz Obr. 18) a připomíná jakýsi mezistupeň mezi vzorky, kde jednoznačně převládá polarizace, a vzorky, kde jednoznačně převládá vodivost příměsi.

Z těchto naměřených závislostí generovaného termoelektrického napětí na teplotním rozdílu byl dále pomocí vztahu (2) pro každý vzorek vypočten Seebeckův koeficient; jeho hodnoty jsou zaznamenány v následující tabulce.

Tabulka 6: Seebeckův koeficient pro jednotlivé vzorky

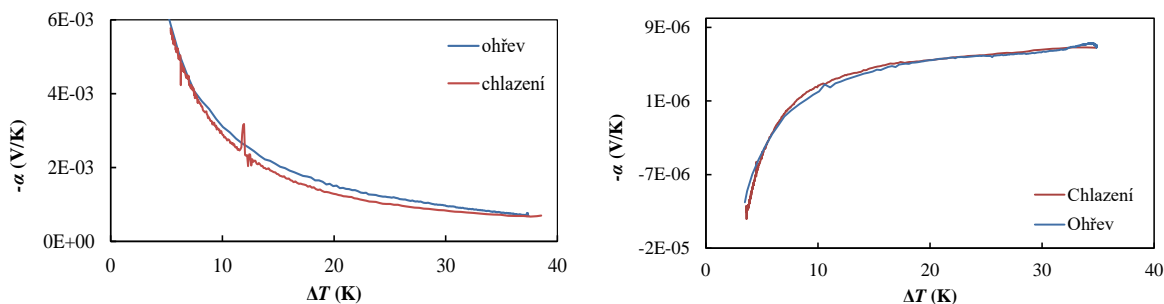
| Vzorek | $ \alpha $ ($\mu\text{V/K}$) |
|-----------|--------------------------------|
| GP 9 % | 659 |
| GP 20 % | 6 |
| CB 0,89 % | 711 |
| CB 3 % | 675 |
| CB 4 % | 1904 |
| CB 4,44 % | 1241 |
| MGP 6 % | 75 |
| MGP 7 % | 7 |
| MGP 8 % | 7 |
| REF A | 764 |
| REF 2 | 445 |



Obr. 19: Seebeckův koeficient jednotlivých vzorků

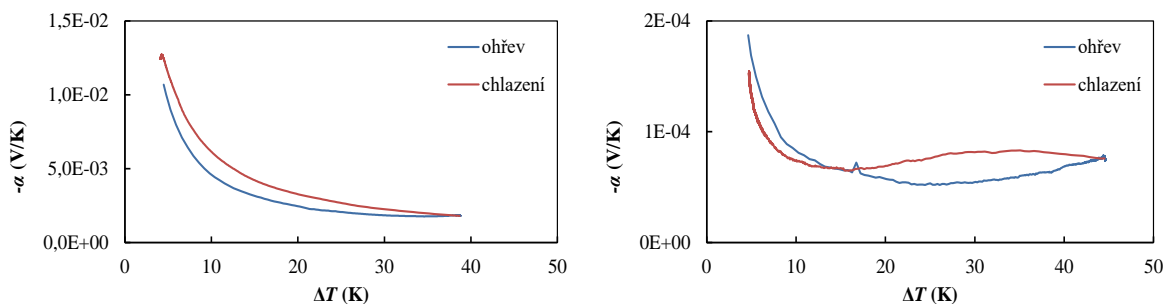
Jak lze pozorovat v grafu výše, vyšší Seebeckův koeficient byl zjištěn u všech vzorků, kde převládá polarizace; tedy u vzorků GP 9 %, CB 0,89 %, CB 3 %, REF A a REF 2. Oproti očekávání se zde ale vyskytly dva vzorky, které svým koeficientem α tyto vzorky předčily; konkrétně se jedná o vzorky CB 4 % a CB 4,44 %. Nejnižších hodnot naopak dosahovaly vzorky MGP 7 %, MGP 8 % a GP 20 %, jejichž Seebeckův koeficient je srovnatelný spíše s ušlechtilými kovy (vztaženo k Pt: $\alpha_{\text{Ag}} = 6,5 \mu\text{V/K}$; $\alpha_{\text{Rh}} = 6 \mu\text{V/K}$; $\alpha_{\text{Au}} = 6,5 \mu\text{V/K}$) [7].

Po vynesení Seebeckova koeficientu v závislosti na teplotním rozdílu lze opět pozorovat rozdíl mezi polarizací a elektronovou vodivostí. Následující grafy znázorňují porovnání vzorků REF A, kde se uplatňuje polarizace, a vzorku GP 20 %, který je již vodivý.



Obr. 20: Seebeckův koeficient referenčního vzorku REF A (vlevo) a vzorku GP 20 % (vpravo) v závislosti na teplotním rozdílu

Jak naznačuje obr. 20, v případě polarizace Seebeckův koeficient s rostoucím teplotním rozdílem klesá, zatímco u elektronové vodivosti naopak roste. Speciálním případem je zde vzorek MGP 6 %, který vykazuje v různých teplotních rozdílech různé chování; dle grafu na obr. 21 převládá do teplotního rozdílu cca 15 K polarizace a následně se vzorek začíná jevit vodivým. Grafy pro ostatní vzorky jsou dostupné v příloze.

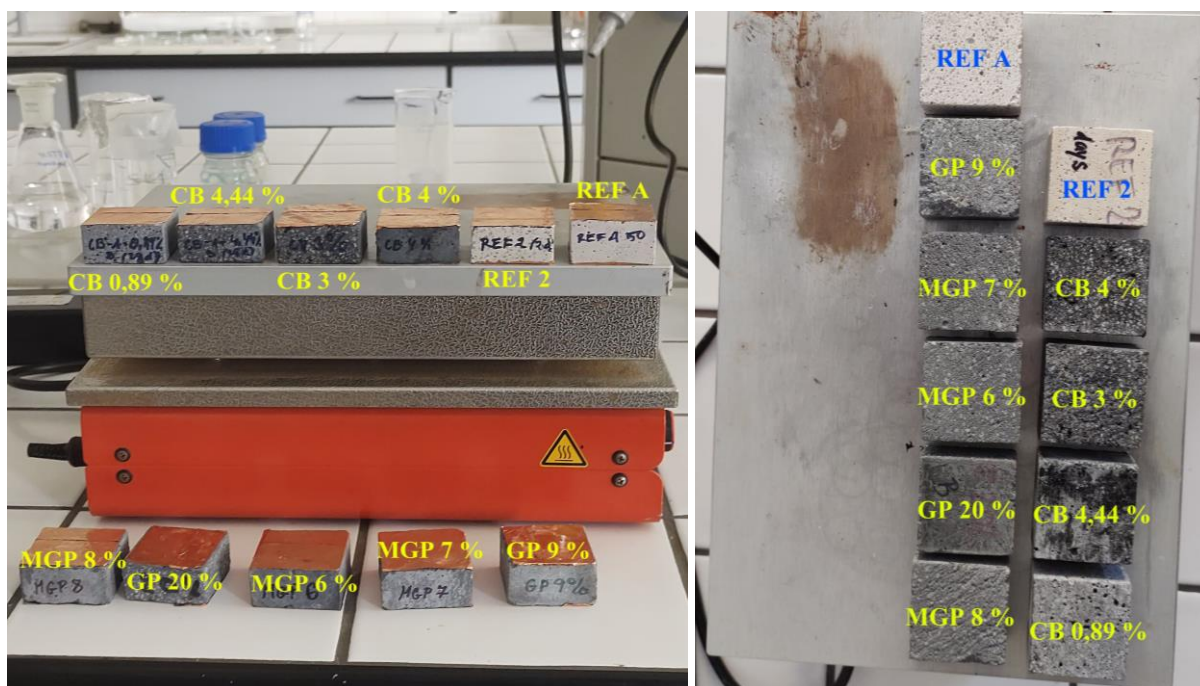


Obr. 21: Seebeckův koeficient vzorku CB 4 % (vlevo) a vzorku MGP 6 % (vpravo) v závislosti na teplotním rozdílu

3.3 Měření tepelných vlastností

3.3.1 Uspořádání experimentu

Pro měření tepelných vlastností byl použit hot-plate v kombinaci s termokamerou. Vzorky byly zahřívány po dobu dvou hodin na teplotu 70 °C a následně byly po dobu dvou hodin chlazeny zpět na laboratorní teplotu, přičemž byly po celou dobu snímány termokamerou v šestivteřinových intervalech. Teplotní rozmezí bylo nastaveno na 0–70 °C. Měření bylo provedeno dvakrát – jednou z profilu a jednou shora.



Obr. 22: Uspořádání měřených vzorků na hot plate pro měření profilu (vlevo) a shora (vlevo)

Získaná data byla dále vyhodnocena pomocí waveletové analýzy v programu HarFA, která poskytla teplotní profil jednotlivých vzorků a hodnoty potřebné pro výpočet měrné tepelné kapacity, součinitele tepelné vodivosti a tepelné difuzivity.

3.3.2 Výsledky a diskuze

V následující tabulce jsou uvedeny zjištěné hodnoty měrné tepelné kapacity c (J/kg/K), součinitele tepelné vodivosti λ (W/m/K) a tepelné difuzivity α_t (m²/s) pro jednotlivé vzorky. Pro jejich výpočet byly použity následující vztahy

$$c = \frac{P}{m(dT/dt)}, \lambda = \frac{Ph}{S\Delta T}, \alpha_t = \frac{\lambda}{\rho_h c} \quad (9)$$

kde P (W) značí výkon, t (s) čas, h (m) je výška vzorku, S (m²) značí plochu styku vzorku s hot-platem, m (kg) je hmotnost vzorku, dT (K) je teplotní rozdíl a ρ_h (kg/m³) značí hustotu materiálu.

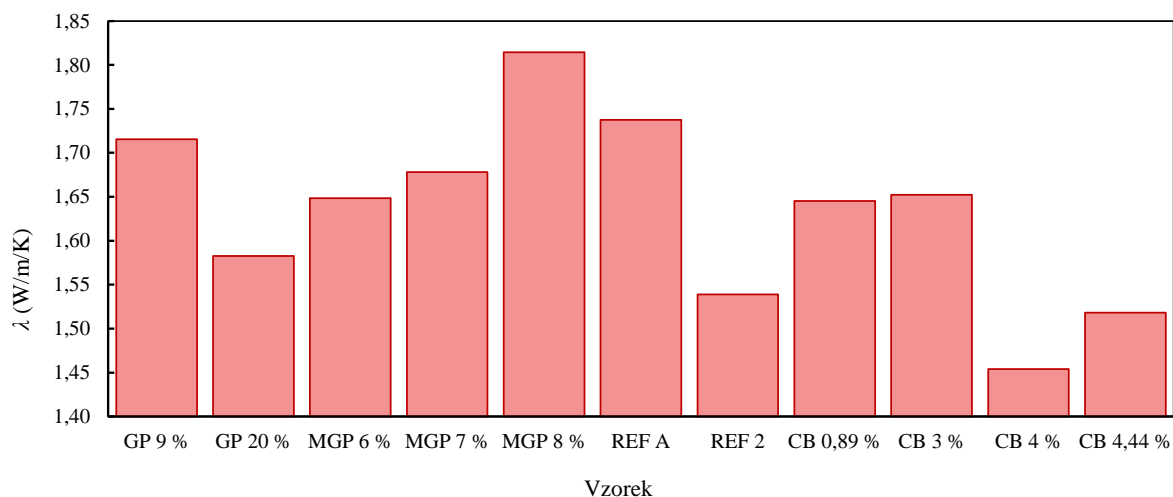
Tabulka 7: Měrná tepelná kapacita, součinitel tepelné vodivosti a tepelná difuzivita vzorků

| vzorek | c (J/kg/K) | λ (W/m/K) | $\alpha_t \cdot 10^7$ (m ² /s) |
|-----------|--------------|-------------------|---|
| GP 9 % | 1191 | 1,715 | 6,80 |
| GP 20 % | 1550 | 1,583 | 4,93 |
| MGP 6 % | 1687 | 1,648 | 5,80 |
| MGP 7 % | 1820 | 1,678 | 5,91 |
| MGP 8 % | 2086 | 1,815 | 5,85 |
| REF A | 1255 | 1,737 | 6,38 |
| REF 2 | 1301 | 1,539 | 5,33 |
| CB 0,89 % | 1314 | 1,645 | 5,85 |
| CB 3 % | 1433 | 1,652 | 5,91 |
| CB 4 % | 1433 | 1,454 | 5,24 |
| CB 4,44 % | 1396 | 1,518 | 5,35 |

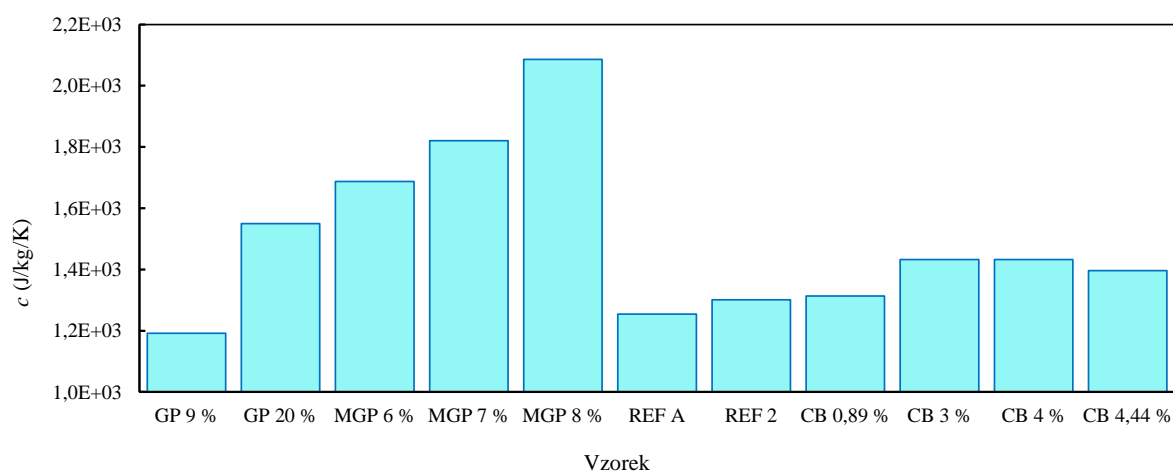
Z uvedených hodnot je zřetelná korelace měrné tepelné kapacity s koncentrací příměsi; měrná tepelná kapacita v rámci řady roste s rostoucí koncentrací vodivé příměsi. Tato tendence obecně platí pro všechny měřené vzorky s výjimkou vzorku CB 4,44 %, kde měrná tepelná kapacita oproti vzorkům CB 3 % a CB 4 % mírně poklesla.

Součinitel tepelné vodivosti zdánlivě žádnou tendenci nevykazuje, vezmeme-li ale v potaz poznatky z měření termoelektrických vlastností, můžeme pozorovat spojitost s typem přenosu náboje. Vzorky, kde převládá polarizace, mají v rámci své řady nejvyšší měrnou tepelnou vodivost, zatímco vzorky, které se již jeví vodivé vykazují hodnoty nižší; konkrétně se jedná o vzorky GP 20 %, CB 4 % a CB 4,44 %. V řadě MGP s rostoucí koncentrací příměsi rostla i měrná tepelná vodivost, což je nejspíše důsledkem toho, že se veškeré vzorky MGP již chovají jako vodiče a není tedy zaznamenán stav před překročením perkolačního prahu. Nabízí se tedy úvaha, že měrná tepelná vodivost do určité koncentrace příměsi roste, následuje skokový pokles a poté se opět začíná zvyšovat.

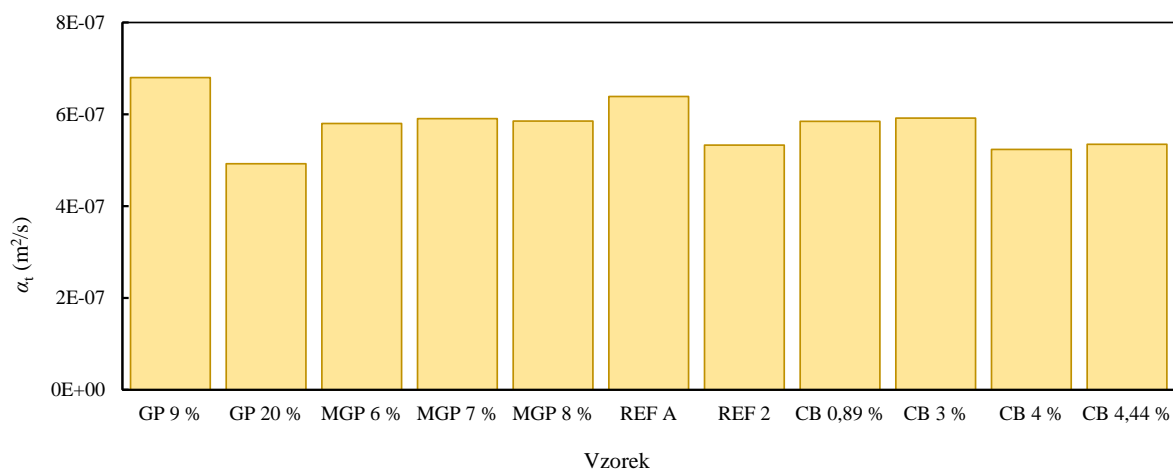
Tepelná difuzivita vzorků se pohybuje v rozmezí od $4,93 \cdot 10^{-7}$ do $6,8 \cdot 10^{-7}$ m²/s, mezi jednotlivými vzorky jsou v tomto ohledu tedy pouze zanedbatelné rozdíly.



Obr. 23: Grafické porovnání součinitele tepelné vodivosti vzorků

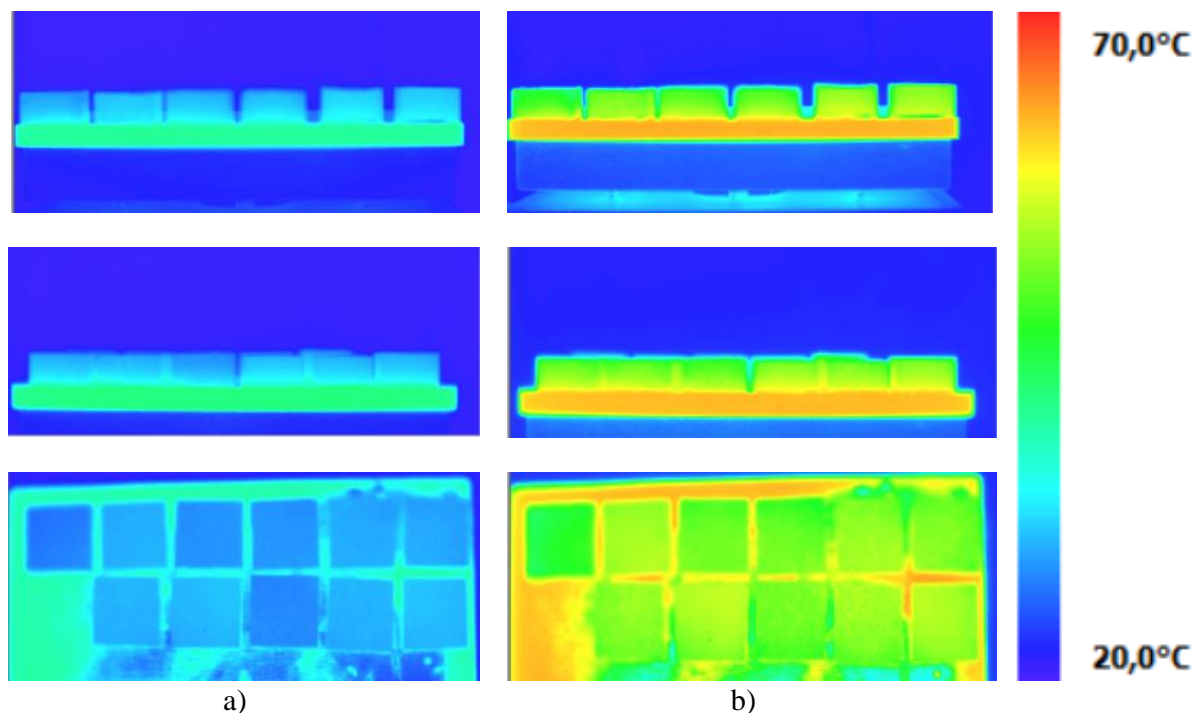


Obr. 24: Grafické porovnání měrné tepelné kapacity vzorků



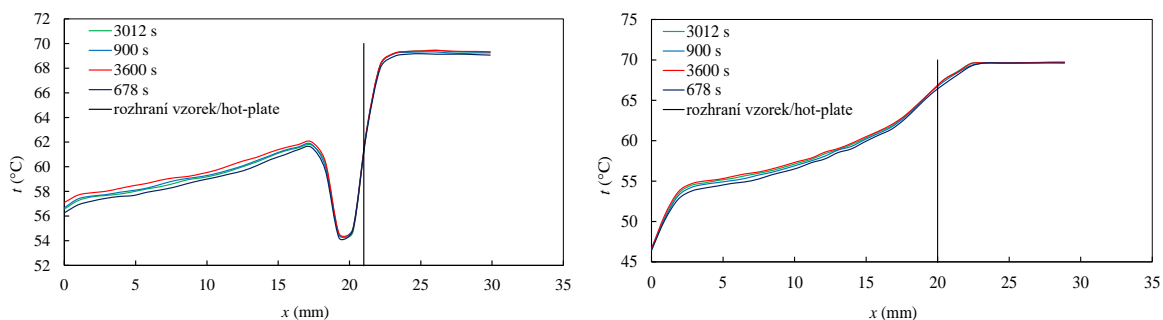
Obr. 25: Grafické porovnání tepelné difuzivity vzorků

Jedná se ovšem pouze o průměrné hodnoty; měření totiž ukázalo, že šíření tepla není v celém vzorku homogenní, nýbrž se v něm ustanovuje jakýsi teplotní profil. Tvar tohoto profilu je odlišný pro každý vzorek; lze jej pozorovat například v následujícím obrázku:



Obr. 26: a) probíhající ohřev hot-plate se vzorky; b) hot-plate ustálený na 70 °C s ohřátými vzorky

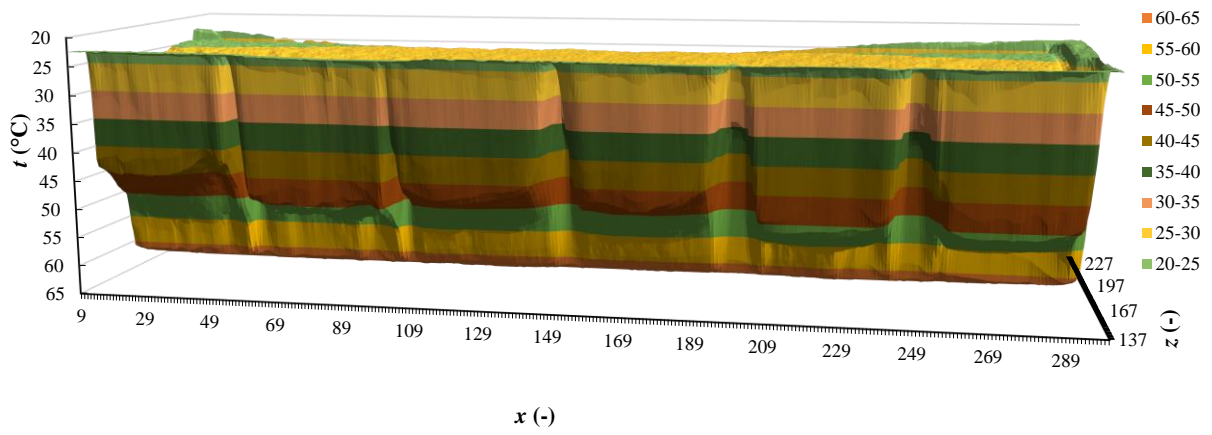
Graficky lze tento teplotní profil vynést jako závislost teploty na výšce vzorku; jako příklad je zde uveden profil teplot referenčního vzorku REF A a vzorku MGP 7 %. Naměřené profily ostatních vzorků jsou k dispozici v příloze.



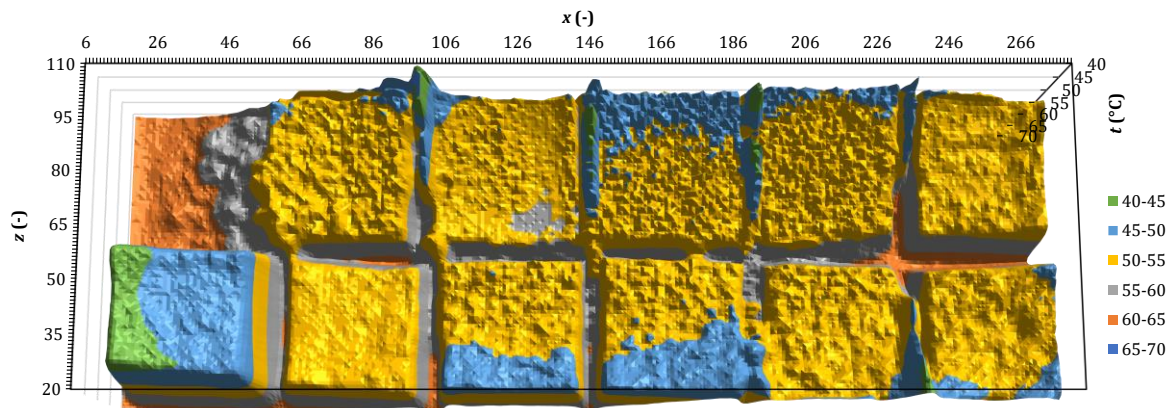
Obr. 27: Teplotní profily vzorků REF A (vlevo) a MGP 7 % (vpravo)

Důsledkem je potom nerovnoměrná distribuce teplot ve vzorku. Obr. 28 a Obr. 29 tuto distribuci znázorňují pro několik vzorků během ohřevu.

Dále je nutno zmínit, že provedené teplotní měření je pouze orientační, protože provedení experimentu a následné vyhodnocení bylo podrobno mnohemu zjednodušení, tudíž nelze samotné hodnoty považovat za příliš vypovídající.



Obr. 28: Rozložení teplot v průběhu ohřevu – měření z profilu



Obr. 29: Rozložení teplot v průběhu ohřevu – měření shora

4 ZÁVĚR

V první řadě bylo zjištěno, že přídavek vodivé příměsi ovlivňuje termoelektrické vlastnosti pozitivně pouze do určité koncentrace (perkolačního prahu). Po překročení této koncentrace hodnota napětí generovaného vzorkem skokově klesá. Nejvyšších hodnot termoelektrického napětí tudíž dosahovaly vzorky obsahující nižší koncentrace vodivé příměsi, konkrétně vzorky CB 0,89 %, CB 3 %, CB 4 %, GP 9 % a REF A.

Koncentrace vodivé příměsi je zároveň úzce spjata s primárním typem nosiče náboje; v nižších koncentracích se jedná o ionty vlastní geopolymeru (polarizace), zatímco ve vyšších koncentracích se hlavním nosičem náboje stávají elektrony příměsi (elektronová vodivost). Typ nosiče se projevoval kromě výsledných hodnot termoelektrického napětí i v samotném průběhu, kde vzorky s převládající polarizací generovaly vyšší napětí ve fázi chlazení, zatímco vzorky s převládající elektronovou vodivostí generovaly vyšší napětí během ohřevu.

První závěr měření tedy zní tak, že z měřených vzorků poskytly vyšší termoelektrické napětí ty vzorky, které v rámci své řady obsahovaly nižší koncentrace vodivé příměsi.

V druhé řadě byl z naměřených závislostí termoelektrického napětí na teplotním rozdílu stanoven Seebeckův koeficient jednotlivých vzorků. Obecně bylo dosaženo nejvyšších hodnot v řadě CB, přičemž maximální hodnota byla zjištěna pro vzorek CB 4 % ($|\alpha| = 1904 \mu\text{V/K}$). Nejnižší hodnoty byly naopak zaznamenány ve vzorcích GP 20 %, MGP 7 % a MGP 8 %, kde se Seebeckův koeficient pohyboval v rámci jednotek $\mu\text{V/K}$, tudíž hodnoty srovnatelné s ušlechtilými kovy.

Z výsledků měření lze zároveň pozorovat, že vzorky řady CB obecně vykazovaly lepší termoelektrické vlastnosti než vzorky řady GP. Domníváme se, že se jedná o důsledek velikosti a tvaru příměsových částic, přičemž saze mají tvar kulový s průměrem 100–500 nm [68], zatímco grafitový prášek má tvar šupinovitý, tloušťku 1–150 μm a průměr 50–800 μm [69]. Saze tak mají lepší předpoklady pro rovnoměrnější rozptýlení v materiálu.

Řady GP a MGP, přestože obě obsahovaly grafitový prášek, také poskytly zásadně rozdílné výsledky. Toto měření tedy navádí k domněnce, že struska pro účely termoelektricity poskytuje lepší výsledky než metalupek. Ovšem pro porovnání jednotlivých řad mezi sebou s vyšší výpovědní hodnotou by bylo zapotřebí provést měření s větším množstvím vzorků o vzájemně stejných koncentracích vodivé příměsi.

V třetí řadě byly měřeny tepelné vlastnosti jednotlivých vzorků, konkrétně měrná tepelná kapacita, součinitel tepelné vodivosti a tepelná difuzivita. Toto měření bylo pouze orientační z důvodu mnohého zjednodušení v průběhu měření a vyhodnocování výsledků, každopádně závěry jsou následující.

Měrná tepelná kapacita roste se zvyšující se koncentrací vodivé příměsi. Tato tendence se projevila ve všech sadách s výjimkou vzorku CB 4,44 %; z důvodu orientačního charakteru měření a malého rozdílu od ostatních hodnot řady CB tuto výjimku považujeme za chybu vzniklou v procesu vyhodnocování. Nejvyšší hodnoty bylo dosaženo ve vzorku MGP 8 % ($c = 2086 \text{ J/kg/K}$); nejnižší naopak ve vzorku GP 9 % ($c = 1191 \text{ J/kg/K}$).

Součinitel tepelné vodivosti roste s koncentrací příměsi do určitého bodu, kde skokově klesá, a následně opět stoupá. Domníváme se, že toto chování je spojeno s primárním typem nosiče, protože pokles součinitele tepelné vodivosti byl zaznamenán vždy ve vzorcích, kde začala převládat elektronová vodivost. Nejvyšší hodnoty bylo dosaženo ve vzorku MGP 8 % ($\lambda = 1,815 \text{ W/m/K}$); nejnižší naopak ve vzorku CB 4 % ($\lambda = 1,454 \text{ W/m/K}$). Tepelnou difuzivitu vykazovaly veškeré vzorky téměř stejnou, a to $6 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ v průměru.

Tímto byly vytyčené cíle naplněny. Zbývá však ještě otázka užitelnosti této problematiky do budoucna; odpověď je následující.

Přestože je otázka energetiky a obnovitelných zdrojů v současné době jedním z největších světových témat, využití odpadního tepla pro výrobu elektrické energie je oblast bádání, která stále zůstává opomíjena. Odpadní teplo je přitom v lidské civilizaci všudypřítomné a jeho využití, převážně v oblasti stavebních materiálů, by mohlo hrát do budoucna významnou roli.

Velký význam by tyto materiály mohly mít v průmyslových zařízeních, kde se nevyhnutelně uvolňuje obrovské množství tepla, např. ocelárny, sklárny, cementárny apod. Opětovné využití tohoto tepla by mohlo zásadně snížit dopad na životní prostředí a zároveň zvýšit energetickou soběstačnost těchto zařízení. Z povahy termoelektrického jevu se také přímo nabízí kombinace těchto materiálů s fotovoltaikou.

Z těchto důvodů se touto problematikou budeme nadále zabývat. Za další krok tímto směrem považujeme studium termoelektrických vlastností s přidaným faktorem fázové přeměny a v tomto duchu také budou pokračovat práce v následujícím období.

5 ZDROJE

- [1] HARPER, Joseph a Ralph STROHL. *Encyclopaedia Britannica* [online]. Chicago: Encyclopaedia Britannica, 2007 [cit. 2022-11-12]. Micropaedia. ISSN 1085-9721. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/thermoelectric-power-generator/Principles-of-operation#ref48996>
- [2] *Encyclopaedia Britannica* [online]. Chicago: Encyclopaedia Britannica, 2022 [cit. 2022-09-23]. Micropaedia. Dostupné z: <https://www.britannica.com/biography/Thomas-Johann-Seebeck>
- [3] BRECHET, Sylvain, Francesco VETRO, Elisa PAPA, Stewart BARNES a Jean-Philippe ANSERMET. Evidence for a Magnetic Seebeck Effect. *Physical Review Letters* [online]. USA: American Physical Society, 22.8.2013, **111**(8), 1 [cit. 2022-09-23]. ISSN 1079-7114. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.087205>
- [4] HALAS, M. *Možnosti využití termoelektrických měničů v elektroenergetice*. Bakalářská práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2011, 46s. Vedoucí práce Ing. Jan Macháček, Ph. D
- [5] AWATI, Rahul. Seebeck effect. In: *TechTarget: Search Networking* [online]. USA: TechTarget, 2021 [cit. 2022-11-12]. Dostupné z: <https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/Seebeck-effect>
- [6] TRINÁCTÝ, 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.
- [7] LASANCE, Clemens J. M. The Seebeck Coefficient. *Electronics Cooling* [online]. Philadelphia: Lectrix, c2023, 1.11.2006 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://www.electronics-cooling.com/2006/11/the-seebeck-coefficient/>
- [8] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Peltierův jev. *Encyklopedie fyziky* [online]. Creative Commons Attribution-Noncommercial-No Derivative Works 3.0., c2006-2022 [cit. 2022-11-12]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/911-peltieruv-jev>
- [9] TERASAKI, Ichiro, ed. Thermal Conductivity and Thermoelectric Power of Semiconductors. In: BHATTACHARYA, Pallab, Hiroshi KAMIMURA a Roberto FORNARI. *Comprehensive semiconductor science and technology* [online]. 1. Amsterdam: Elsevier Science, 2011, s. 326-358 [cit. 2022-10-14]. ISBN 978-0-444-53153-7. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444531537000705#!>
- [10] DISALVO, Francis. Thermoelectric Cooling and Power Generation. *Science* [online]. Washington DC: American Association for the Advancement of Science, 1999, **285**(5428), 703-706 [cit. 2022-11-12]. ISSN 0036-8075. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1126/science.285.5428.703>
- [11] PACHOLÍK, V. *Počítačové modelování polovodičových diod*. Bakalářská práce. Brno: FEKT VUT, 201, 47 s. Vedoucí práce Ing. Michal Pokorný.
- [12] RAIDA, Zbyněk a Dušan ČERNOHORSKÝ. *Model driftu a difuze: Podrobnější popis*. Brno: FEEC VUT Brno, 2010, 9 s. Dostupné také z: <https://www.radio.feec.vutbr.cz/raida/multimedia/cz/8-1-B.pdf>
- [13] YASIR, Mohammad. Maxwell's Equations and Displacement Current. In: *Owlcation* [online]. Berkeley (USA): The Arena Group, 13.07.2022, s. 1 [cit.

- 2022-11-10]. Dostupné z: <https://owlcation.com/stem/maxwell-equations-displacement-current>
- [14] ČECH, Jindřich. *Elektrický proud – proud nabitých částic je roven náboji, který projde určitou plochou za jednotku času* [online]. 2005, 9 s. Dostupné také z: <https://adoc.pub/v-stacionarni-proudove-pole-2-v1-elektricky-proud-2-v2-proud.html>
- [15] Heating circuit: Temperature distribution as a result of Joule heating. In: *Multiphysics Cyclopedia* [online]. Stockholm: COMSOL, 2014 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: https://cdn.comsol.com/cyclopedia/the-joule-heating-effect/temp_results.png
- [16] Heating circuit: The stress is highest in the red areas. The glass plate in the circuit bends due to the heat imposed on the plate and the expansion of the circuit. In: *Multiphysics Cyclopedia* [online]. Stockholm: COMSOL, 2014 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: https://cdn.comsol.com/cyclopedia/the-joule-heating-effect/stress_results.png
- [17] LEE, HoSung. The Thomson effect and the ideal equation on thermoelectric coolers. *Energy* [online]. Amsterdam: Elsevier Science, 22.05. 2013, **56**, 61-69 [cit. 2022-10-30]. ISSN 0360-5442. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.04.049>
- [18] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Thomsonův jev. *Encyklopedie fyziky* [online]. Creative Commons Attribution-Noncommercial-No Derivative Works 3.0., c2006-2022 [cit. 2022-11-12]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main/article/view/912-thomsonuv-jev>
- [19] Thomson Effect | Positive & Negative Types. *Electricalvoice: The Complete Free Study Material and Notes for Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering Students* [online]. Electricalvoice, c2021, 29.04.2018 [cit. 2022-11-12]. Dostupné z: <https://electricalvoice.com/thomson-effect-positive-negative-type/>
- [20] DUNN, Isaac, Ramzy DAOU a Colin ATKINSON. A straightforward 2ω technique for the measurement of the Thomson effect. *Review of Scientific Instruments* [online]. AIP Publishing, c2022, 08.02.2019, **90**(2), 024902 [cit. 2022-11-13]. ISSN 1089-7623. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1063/1.5055826>
- [21] Thomson effect and Thomson coefficient (σ). In: *BrainKart: Best A to Z Online Education* [online]. Chennai: Therithal info, c2018-2023 [cit. 2022-11-29]. Dostupné z: <https://img.brainkart.com/article/articlekwxgOthomson.jpg>
- [22] Materials for Advanced Thermoelectrics. In: *Merck* [online]. Darmstadt (Německo): Merck, c2022 [cit. 2022-11-29]. Dostupné z: <https://www.sigmaaldrich.com/deepweb/assets/sigmaaldrich/marketing/global/images/technical-documents/articles/materials-science-and-engineering/microelectronics-and-nanoelectronics/thermoelectric-module/thermoelectric-module.jpg>
- [23] DUGA, Ján a Marek KNAP. *LED svietidlo s premenou odpadového tepla na elektrickú energiu*. 2014. SK. 50024-2014 A3. Uděleno 20.03.2014. Zapsáno 02.10.2015.
- [24] LAGA, O. *Využití termoelektrického generátoru pro zvýšení využití odpadního tepla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 67 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.
- [25] O'BRIAN, R. C., R. M. AMBROSI, N. P. BANNISTER, S. D. HOWE a H. V. ATKINSON. Safe radioisotope thermoelectric generators and heat sources for space applications. *Journal of Nuclear Materials* [online]. Amsterdam: Elsevier Science, c2023, 15.07.2008, **377**(3), 506-521 [cit. 2023-03-17]. ISSN 1873-4820. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2008.04.009>

- [26] VOBOŘIL, David. Radioizotopový termoelektrický generátor – tajemství energie v dalekém vesmíru. *OENERGETICE.cz: denní zpravodajství z energetiky* [online]. Třebíč: OM Solutions, 19.10.2015 [cit. 2022-11-03]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/radioizotopovy-termoelektricky-generator-tajemstvi-energie-v-dalekem-vesmiru>
- [27] KOSHKO, Boris, Yurij KRASNOV, Nikolaj LEDNEV, Igor MAKAREVICH, Vladimir MIRONOV a Vladimir TYCHINA. *Radioisotopic thermoelectric generator*. 1987. SU. 1325572 A1. Uděleno 22.08.1985. Zapsáno 23.07.1987.
- [28] KUROKI, Takashi, Kazuhisa KABEYA, Kazuya MAKINO et al. Thermoelectric Generation Using Waste Heat in Steel Works. *Journal of Electronic Materials* [online]. Švýcarsko: Springer Nature, 22.03.2014, **43**(6), 2405–2410 [cit. 2022-11-10]. ISSN 0361-5235. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/s11664-014-3094-5>
- [29] MIRHOSSEINI, Mojtaba, Alireza REZANIA a Lasse ROSENDAHL. Harvesting waste heat from cement kiln shell by thermoelectric system. *Energy* [online]. Elsevier Science, 01.02.2019, **168**, 358-369 [cit. 2022-11-10]. ISSN 0360-5442. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.109>
- [30] LUO, Qi, Li PENG, LanLan CAI et al. A Thermoelectric Waste-Heat-Recovery System for Portland Cement Rotary Kilns. *Journal of Electronic Materials* [online]. Springer Nature, 09.12.2014, **44**(6), 1750–1762 [cit. 2022-11-10]. ISSN 0361-5235. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/s11664-014-3543-1>
- [31] IVANOV, Kaloyan. Synthesis and Study on Waste Heat Thermoelectric Generator. In: *ResearchGate* [online]. Berlín: ResearchGate, c2008-2022 [cit. 2022-11-29]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/profile/Kaloyan-Ivanov-4/publication/342586075/figure/fig1/AS:913266352091136@1594751074335/Schematic-of-a-Peltier-module.ppm>
- [32] PARK, Sunghoon, Seungki JO, Beomjin KWON et al. High-performance shape-engineerable thermoelectric painting. *Nat Commun* [online]. Nature Communications, 11.11.2016, **7**, 13403 [cit. 2022-11-08]. ISSN 2041-1723. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1038/ncomms13403>
- [33] SERRANO-CLAUMARCHIRANT, José, Bejan HAMAWANDI, Adem ERGÜL, Andrés CANTARERO, Clara M GÓMEZ, Pankaj PRIYADARSHI, Neophytos NEOPHYTOU a Muhammet TOPRAK. Thermoelectric Inks and Power Factor Tunability in Hybrid Films through All Solution Process. *ACS Applied Materials & Interfaces* [online]. American Chemical Society, 22.04.2022, **14**(17), 19295-19303 [cit. 2022-11-08]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1021/acsami.1c24392>
- [34] HRBÁČEK, Jan. V Česku loni vzrostla produkce oceli o devět procent. Letos už to podle odhadů tolik nebude. In: *Ekonomický deník: informace pro informované* [online]. Praha: Media Network s.r.o, 10.04.2022, s. 1 [cit. 2022-11-10]. Dostupné z: <https://ekonomickydenik.cz/v-cesku-loni-vzrostla-produkce-oceli-o-devet-procent-letos-uz-to-podle-odhadu-tolik-nebude/>
- [35] TAN, Serhat, Huseyin DEMIREL a Ilker TURKER. The efficiency of using a thermoelectric module on CPU systems in the perspective of cooling. In: *AWERProcedia Information Technology & Computer Science* [online]. 1. Turecko: İstanbul: Hüseyin Uzunboylu, 2012, s. 1069-1073 [cit. 2022-11-12]. ISSN 2147-5369. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/283854907_The_efficiency_of_using_a_thermoelectric_module_on_CPU_systems_in_the_perspective_of_cooling
- [36] HE, Wei, Gan ZHANG, Xingxing ZHANG, Jie JI, Guiqiang LI a Xudong ZHAO. Recent development and application of thermoelectric generator and cooler. *Applied*

- Energy* [online]. Elsevier Science, 01.04.2015, **143**, 1-25 [cit. 2022-11-12]. ISSN 0306-2619. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.075>
- [37] MELNIČUK, Petr. *Měření teploty termočlánky* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116662>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Kamil Podaný.
- [38] Jaké jsou nejčastější aplikace termočlánků?. *JAKAR Electronics: OMEGA Engineering Česká Republika* [online]. Karviná: Jakar Electronics, c2020-2022 [cit. 2022-11-14]. Dostupné z: <https://www.jakar.cz/advisor/jake-jsou-nejcastejsi-aplikace-termoclanku>
- [39] Termočlánek - termoelektrický snímač teploty. In: *JAKAR electronics* [online]. Karviná: Jakar Electronics, c2020-2022 [cit. 2022-11-29]. Dostupné z: <https://www.jakar.cz/advisor/co-je-to-termoclanek-typu-k>
- [40] Termočlánek typu S. In: *SAFINA* [online]. Vestec: SAFINA, c2022 [cit. 2022-11-29]. Dostupné z: <https://www.safina.cz/vyrobek/termoclanek-typu-s/#content>
- [41] Termočlánek typu R. In: *SAFINA* [online]. Vestec: SAFINA, c2022 [cit. 2022-11-29]. Dostupné z: <https://www.safina.cz/vyrobek/termoclanek-typu-r/>
- [42] Termočlánek typu B. In: *SAFINA* [online]. Vestec: SAFINA, c2022 [cit. 2022-11-29]. Dostupné z: <https://www.safina.cz/vyrobek/termoclanek-typu-b/>
- [43] Type K Thermocouple. *Thermocouple info* [online]. San Diego: REOTEMP Instrument Corporation, 2011 [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <https://www.thermocoupleinfo.com/type-k-thermocouple.htm>
- [44] Types of Thermocouples with Temperature Ranges & Color Codes. *Blaze Probes* [online]. Ohio: Blaze Probes, c2023 [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <https://www.blazeprobes.com/types-thermocouples-temperature-ranges-color-codes/>
- [45] Type M thermocouple. *T&M Atlantic* [online]. Florida: T&M Atlantic, c2010-2023 [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: https://www.tmatlantic.com/encyclopedia/index.php?ELEMENT_ID=22741
- [46] Types of Thermocouples. *InstrumentationTools* [online]. Andhra Pradesh: InstrumentationTools, c2023 [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: https://instrumentationtools.com/types-of-thermocouples/?utm_content=cmp-true
- [47] HALFAR, I. *Měření teploty v elektrických strojích*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 64 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marcel Janda, Ph.D.
- [48] KALINA, Lukáš. *Syntéza aluminosilikátových systémů na bázi geopolymérů orientovaná na využívání sekundárních surovin*. Brno, 2011. Doktorská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce prof. Ing. Jaromír Havlica, DrSc.
- [49] VLKOVÁ, Jitka. Cement bez emisí nejde. Uhlíkovou stopu pomáhá snížit pálení odpadu, říká šéf tuzemské cementárny. In: *Ekonews* [online]. Praha: Ekonews For Future Media, c2019-2020, 11.11.2022 [cit. 2022-11-18]. Dostupné z: <https://www.ekonews.cz/cement-bez-emisi-nejde-uhlikovou-stopu-pomaha-snizit-paleni-odpadu-rika-sef-tuzemske-cementarny/>
- [50] PŘIBYLA, Ondráš. Jakou roli hrají emise CO₂ z výroby cementu v klimatické změně?. In: *Fakta o změně klimatu: Veřejně dostupné infografiky, data a články* [online]. Brno: Otevřená data o klimatu, z. ú., c2022, 13.02.2021 [cit. 2022-11-18]. Dostupné z: <https://faktaoklimatu.cz/explainery/emise-vyroba-cementu>
- [51] MIZEROVÁ, Cecílie. *Směsná alkalicky aktivovaná aluminosilikátová pojiva*. Brno, 2016. 53 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav chemie. Vedoucí práce doc. RNDr. Pavel Rovnaník, Ph.D.

- [52] FLORIÁN, P. *Studium elektrických a dielektrických vlastností alkalicky aktivovaných aluminosilikátů se zvýšenou elektrickou vodivostí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2018. 118 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc.
- [53] HABERT, G. Assessing the environmental impact of conventional and ‘green’ cement production. In: *Eco-efficient Construction and Building Materials: Life Cycle Assessment (LCA), Eco-Labeling and Case Studies* [online]. Londýn: Woodhead Publishing, c2014, s. 220-222 [cit. 2022-11-18]. ISBN 978-0-85709-767-5. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1533/9780857097729.2.199>
- [54] ZMEŠKAL, Oldřich, Lucie TRHLÍKOVÁ, Jan POSPÍŠIL, Lukáš FIALA a Pavel FLORIAN. Investigation of electric and thermal properties of alkali-activated aluminosilicates with an CNT admixture. *Ceramics-Silikáty* [online]. Praha: Institute of Rock Structure and Mechanics of the CAS & University of Chemistry and Technology, Prague, c2015-2022, 09.12.2019, **64**(2), 180-189 [cit. 2022-11-20]. ISSN 1804-5847. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.13168/cs.2020.0007>
- [55] RANA, Sohail, Raul FANGUEIRO, Antonio Gomes CORREIA, et al. A review on smart self-sensing composite materials for civil engineering applications. *AIMS Materials Science* [online]. Springfield (USA): AIMS Press, 2016, **3**(2), 357-379 [cit. 2022-11-21]. ISSN 2372-0484. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3934/matserci.2016.2.357>
- [56] SADATI, Sajed, Kristen CETIN, Halil CEYLAN a Sunghwan KIM. Energy-efficient design of a carbon fiber-based self-heating concrete pavement system through finite element analysis. *Clean Technologies and Environmental Policy: Focusing on Technology Research, Innovation, Demonstration, Insights and Policy Issues for Sustainable Technologies* [online]. Heidelberg: Springer Nature Switzerland, 2020, **22**(5), 1145–1155 [cit. 2022-11-21]. ISSN 1618-9558. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/s10098-020-01857-4>
- [57] ZMEŠKAL, Oldřich, Lucie TRHLÍKOVÁ, Lukáš FIALA, et al. Thermal properties of alkali-activated aluminosilicates with CNT admixture. *AIP Conference Proceedings* [online]. Rhodos (Řecko): AIP Publishing, 2017, **1863**(1), 150011 [cit. 2022-11-21]. ISBN 978-0-7354-1538-6. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1063/1.4992333>
- [58] BARTHEL, Maria, Nico VOGLER, Wolfram SCHMIDT a Hans-Carsten KÜHNE. Outdoor performance tests of self-cooling concrete paving stones for the mitigation of urban heat island effect. *Road Materials and Pavement Design* [online]. Londýn: Informa UK Limited, c2022, **18**(2), 453-463 [cit. 2022-11-22]. ISSN 2164-7402. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1163282>
- [59] ASADI, Iman, Payam SHAFIGH, et al. Thermal conductivity of concrete – A review. *Journal of Building Engineering* [online]. Amsterdam: Elsevier, c2022, 2018, **20**(1), 81-93 [cit. 2022-11-22]. ISSN 2352-7102. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.07.002>
- [60] SNELL, Clarke, Brett TEMPEST a Thomas GENTRY. Comparison of the Thermal Characteristics of Portland Cement and Geopolymer Cement Concrete Mixes. *Journal of Architectural Engineering* [online]. Reston (Virginie): American Society of Civil Engineers, c1996-2022, 19.01.2017, **23**(2), 04017002 [cit. 2022-11-22]. ISSN 1943-5568. Dostupné z: doi:[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000240](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000240)
- [61] DEMIRBOĞA, Ramazan. Thermal conductivity and compressive strength of concrete incorporation with mineral admixtures. *Building and Environment* [online].

- Amsterdam: Elsevier, 2007, **42**(7), 2467-2471 [cit. 2022-11-22]. ISSN 0360-1323. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.010>
- [62] ZIMÁK, Jiří. *Všeobecná mineralogie: část 2*. Olomouc: Katedra geologie PřF UP, 2005, 56 s. Dostupné také z: https://www.geology.upol.cz/upload/studijni_materialy/plne_texty_skript/2005_Zimak_Jiri_Vseobecna_mineralogie2.pdf
- [63] TZOUNIS, Lazaros, Marco LIEBSCHER, Robert FUGE, Albrecht LEONHARDT a Viktor MECHTCHERINE. P- and n-type thermoelectric cement composites with CVD grown p- and n-doped carbon nanotubes: Demonstration of a structural thermoelectric generator. *Energy and Buildings* [online]. Amsterdam: Elsevier B.V., c2022, 15.05.2019, **191**, 151-163 [cit. 2022-11-22]. ISSN 0378-7788. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.03.027>
- [64] GHOSH, Sampad, Sivasankaran HARISH, Michitaka OHTAKI a Bidyut Baran SAHA. Thermoelectric figure of merit enhancement in cement composites with graphene and transition metal oxides. *Materials Today Energy* [online]. Amsterdam: Elsevier, 2020, **18**, 100492 [cit. 2022-11-22]. ISSN 2468-6069. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.mtener.2020.100492>
- [65] DAVOODABADI, Maliheh, Ioanna VARELI, Marco LIEBSCHER, et al. Thermoelectric Energy Harvesting from Single-Walled Carbon Nanotube Alkali-Activated Nanocomposites Produced from Industrial Waste Materials. *Nanomaterials* [online]. Basilej (Švýcarsko): MDPI, c2021, **11**(5), 1095 [cit. 2022-11-22]. ISSN 2079-4991. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/nano11051095>
- [66] CAI, Jingming, Jiawei TAN a Xiaopeng LI. Thermoelectric behaviors of fly ash and metakaolin based geopolymer. *Constructions and Building Materials* [online]. Amsterdam: Elsevier, c2022, 20.03.2020, **237**, 117757 [cit. 2022-11-23]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117757>
- [67] CAI, Jingming a Xiaopeng LI. Thermoelectric properties of geopolymers with the addition of nano-silicon carbide (SiC) powder. *Ceramics International* [online]. Amsterdam: Elsevier & Techna, c2022, 15.07.2021, **47**(14), 19752-19759 [cit. 2022-11-23]. ISSN 0272-8842. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.03.313>
- [68] Carbon Black. In: KAUSAR, Ayesha. *Polymeric Nanocomposites with Carbonaceous Nanofillers for Aerospace Applications* [online]. 1. Sawston (UK): Woodhead Publishing, 2023, s. 23-59 [cit. 2023-05-08]. ISBN 978-0-323-99657-0. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780323996570000090>
- [69] Graphite. *Merck* [online]. Darmstadt: Merck, c2023 [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <https://www.sigmaaldrich.com/CZ/en/product/aldrich/808083>

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Použité zkratky

| | |
|-----|---|
| TEG | Termoelektrický generátor |
| RTG | Radioizotopický termoelektrický generátor |
| TEM | Termoelektrický modul |
| TEC | Termoelektrický chladič |
| CPU | Centrální procesorová jednotka |
| AAA | Alkalicky aktivované hlinitokřemičitany |
| PC | Portlandský cement |
| CNT | Uhlíkové nanotrubičky |
| UHI | Městský tepelný ostrov |
| AAS | Alkalicky aktivovaná struska |
| GP | Grafitový prášek |
| CB | Uhlíkové saze |
| MGP | Geopolymer na bázi alkalicky aktivovaného metalupku |

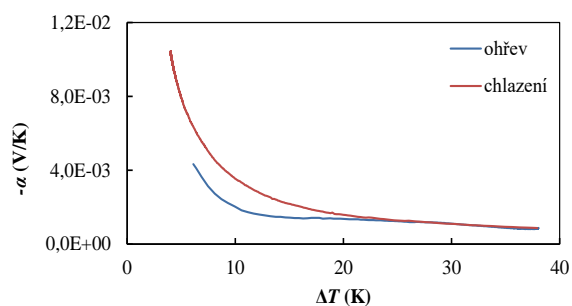
Použité symboly

| | |
|-------------------------|-----------------------------------|
| A (J) | Výstupní práce |
| q (C) | Náboj |
| q_e (C) | Náboj elektronu |
| U_v (V) | Rozdíl potenciálů |
| U (V) | Napětí |
| α (V/K) | Seebeckův koeficient |
| π (J/C) | Peltierův koeficient |
| Q (J) | Teplo |
| t (s) | Čas |
| dQ/dt (J/s) | Tepelný tok |
| I (A) | Elektrický proud |
| R (Ω) | Odpor vodiče |
| m (kg) | Hmotnost |
| c (J/kg/K) | Měrná tepelná kapacita |
| T (K) | Termodynamická teplota |
| p (W/m ³) | Objemová hustota výkonu |
| W (J) | Práce |
| V (m ³) | Objem |
| P (W) | Výkon |
| F (N) | Elektrická složka Lorentzovy síly |
| v (m/s) | Driftová rychlost |

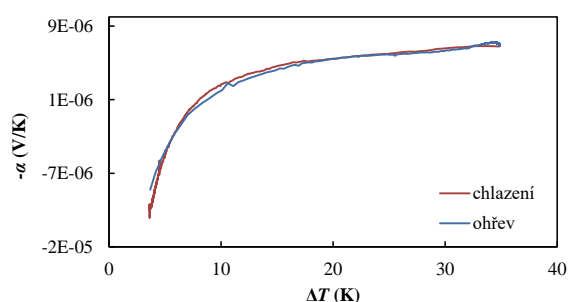
| | |
|--------------------------------|---------------------------------|
| E (N/C) | Intenzita elektrického pole |
| ρ (C/m ³) | Objemová hustota náboje |
| l (m) | Délka vodiče |
| τ (V/K) | Thomsonův koeficient |
| h (m) | Výška vzorku |
| S (m ²) | Plocha styku vzorku s hot-plate |
| ρ_h (kg/m ³) | Hustota materiálu |
| λ (W/m/K) | Součinitel tepelné vodivosti |
| α_t (m ² /s) | Tepelná difuzivita |

7 PŘÍLOHY

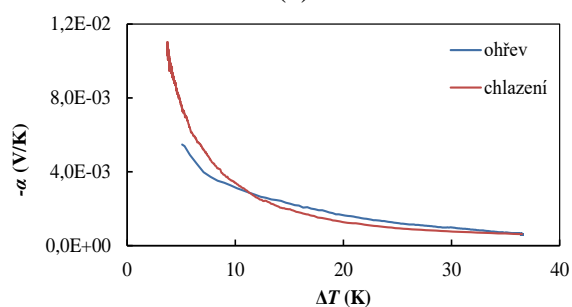
7.1 Seebeckův koeficient v závislosti na teplotním rozdílu



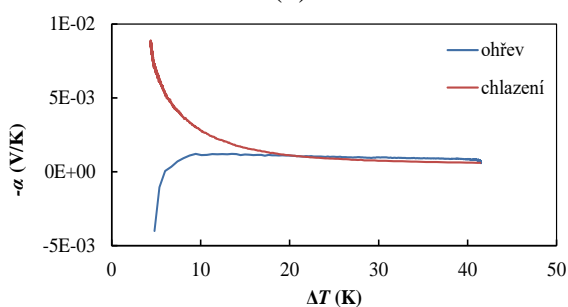
(a)



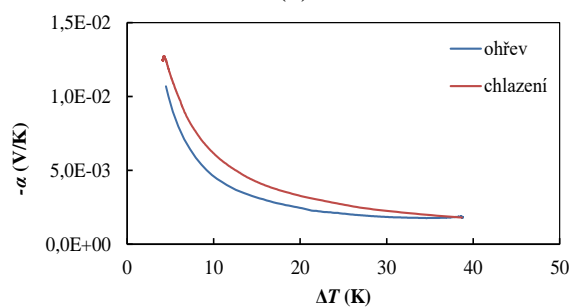
(b)



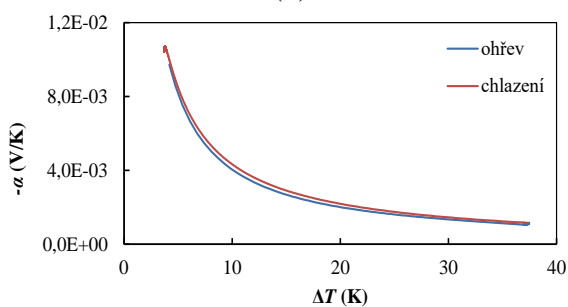
(c)



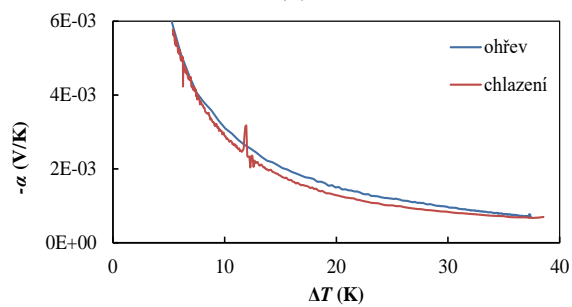
(d)



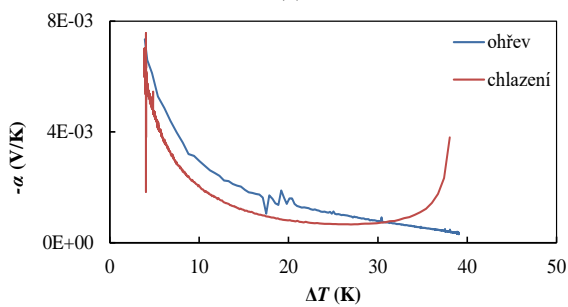
(e)



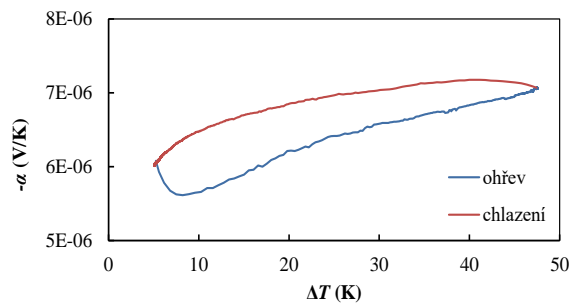
(f)



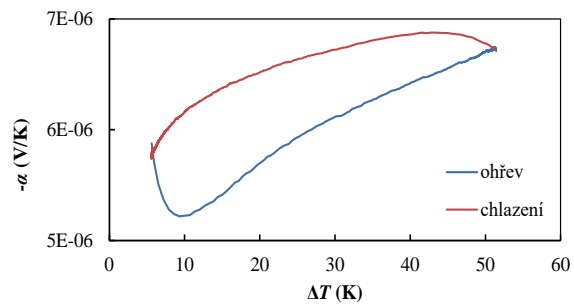
(g)



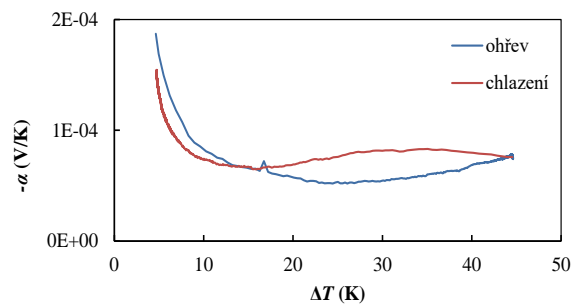
(h)



(i)



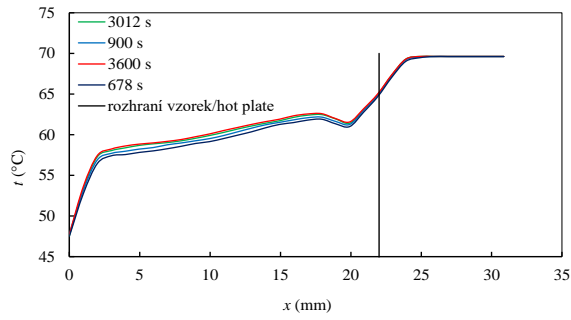
(j)



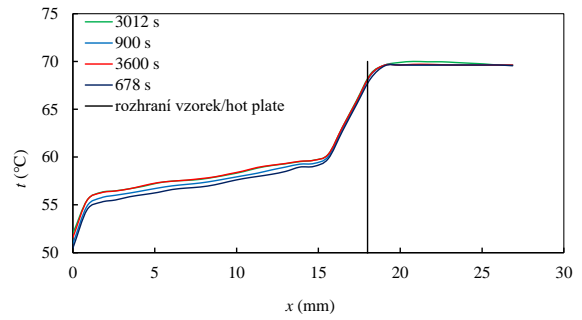
(k)

Obr. 30: Seebeckův koeficient jednotlivých vzorků v závislosti na teplotním rozdílu;
 a) GP 9 %, b) GP 20 %, c) CB 0,98 %, d) CB 3 %, e) CB 4 %, f) CB 4,44 %, g) REF A,
 h) REF 2, i) MGP 7 %, j) MGP 8 %, k) MGP 6 %

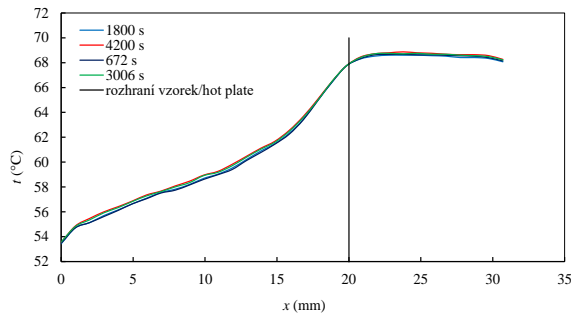
7.2 Teplotní profily jednotlivých vzorků



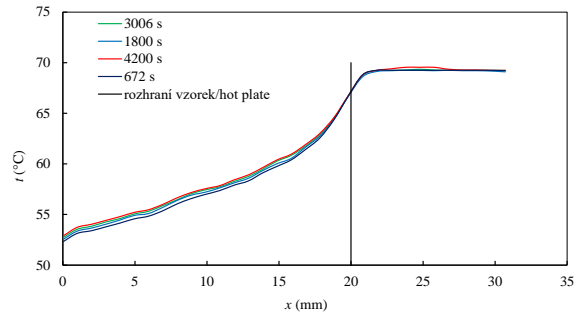
(a)



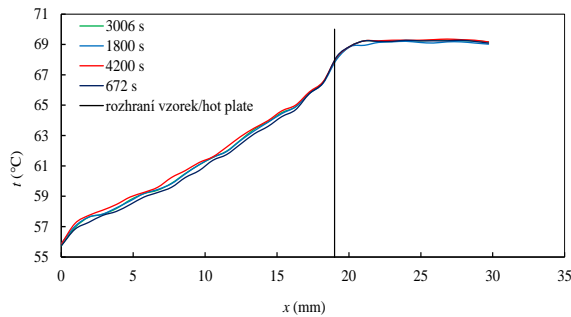
(b)



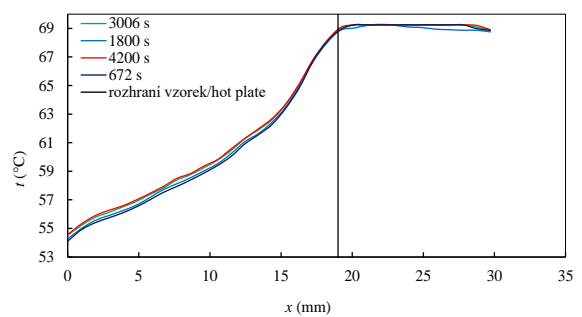
(c)



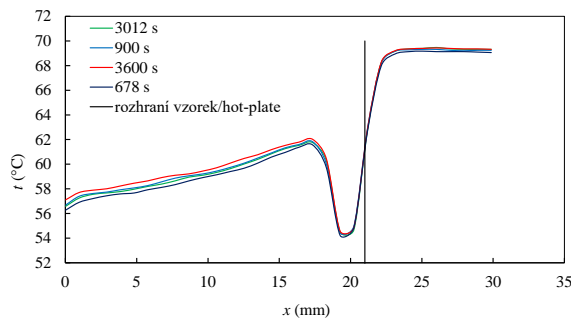
(d)



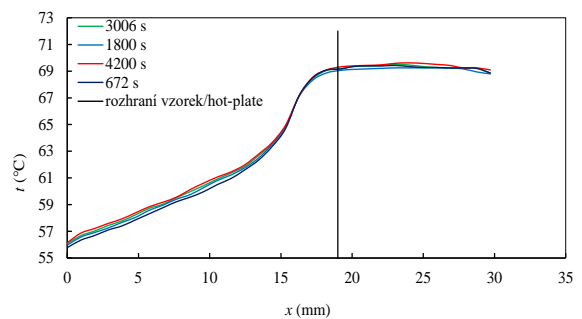
(e)



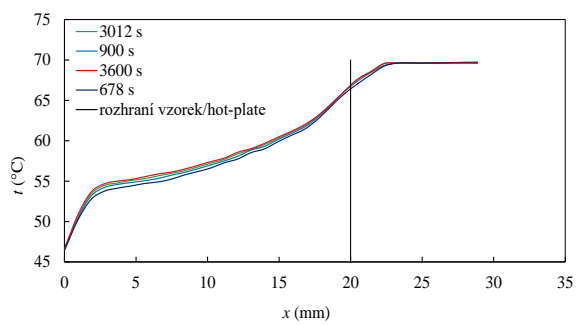
(f)



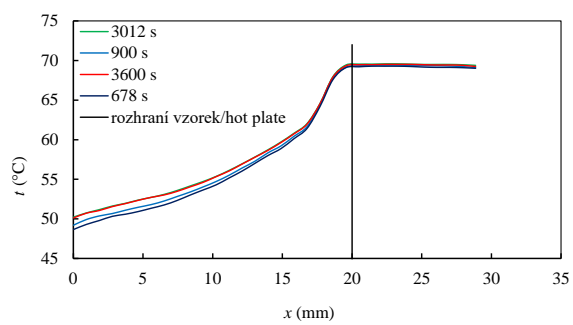
(g)



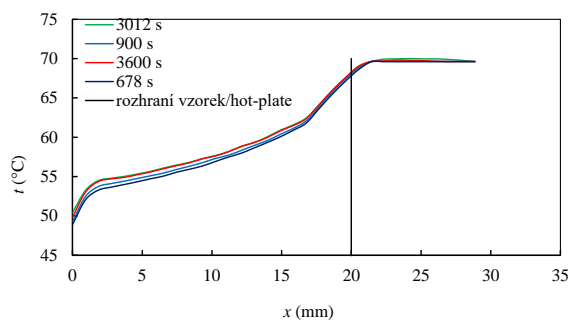
(h)



(i)



(j)



(k)

Obr. 31: Teplotní profil jednotlivých vzorků v závislosti na teplotním rozdílu;
 a) GP 9 %, b) GP 20 %, c) CB 0,98 %, d) CB 3 %, e) CB 4 %, f) CB 4,44 %, g) REF A,
 h) REF 2, i) MGP 7 %, j) MGP 8 %, k) MGP 6 %