

Efektívna tepelná vodivosť kompozitného materiálu

Marián Janek

17. marca 2025

1 Teoretický úvod

Efektívna tepelná vodivosť (k_{eff}) kompozitného materiálu je kľúčová vlastnosť, ktorá určuje, ako dobre materiál vedie teplo. V prípade polymérov dopovaných nanočasticami závisí táto hodnota od:

1. **Tepelnej vodivosti matice** (k_p) – základného polyméru (napr. polyuretán), ktorý má obvykle nízku tepelnú vodivosť.
2. **Tepelnej vodivosti výplne** (k_f) – nanočastíc (napr. AlN), ktoré majú vysokú tepelnú vodivosť a slúžia na zlepšenie vlastností kompozitu.
3. **Objemovej frakcie výplne** (ϕ_f) – podielu objemu nanočastíc v kompozite.
4. **Geometrie a distribúcii častíc** – tvaru a usporiadania výplne v matici, ktoré ovplyvňujú spôsob vedenia tepla.

Modely pre predikciu k_{eff}

1. Maxwellov model

- Vhodný pre nízke objemové frakcie ($\phi_f < 0.5$).
- Predpokladá náhodné rozloženie guľových častíc bez interakcií.
- Vzorec:

$$k_{\text{eff}} = k_p \cdot \frac{k_f + 2k_p + 2\phi_f(k_f - k_p)}{k_f + 2k_p - \phi_f(k_f - k_p)} \quad (1)$$

2. Agrawalov model

- Vhodný pre širší rozsah ϕ_f (až do $\sim 55\%$).
- Zohľadňuje interakcie častíc a korekčný faktor ξ kompenzuje nedokonalosti distribúcie.

- Vzorec:

$$k_{\text{eff}} = \xi \cdot \frac{1}{\frac{1}{k_p} - \frac{1}{k_p} \left(\frac{6\phi_f}{\pi}\right)^{1/3} + \frac{4}{k_p \left(\frac{4\pi}{3\phi_f}\right)^{2/3} + \left(\frac{2\phi_f}{9\pi}\right)^{1/3} \cdot 2\pi(k_f - k_p)}} \quad (2)$$

AlN (oxid hlinitý) má vysokú tepelnú vodivosť ($\sim 200 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), čo ho robí ideálnym pre aplikácie v elektronike, kde je potrebné efektívne odvádzať teplo, zatiaľ čo polyuretán s nízkou tepelnou vodivosťou ($\sim 0.2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) slúži ako izolačná matica. Kombináciou týchto materiálov vznikajú kompozity s optimalizovanými vlastnosťami, ktoré nachádzajú uplatnenie v tepelnom manažmente elektronických zariadení (napr. čipy, LED diódy), v tepelne izolačných materiáloch s kontrolovanou vodivosťou a v štruktúrnych komponentoch, kde je potrebná nízka hmotnosť a vysoká účinnosť.

Cieľ úlohy

Vypočítajte efektívnu tepelnú vodivosť (k_{eff}) polyuretánového kompozitu dopovaného nanočasticami AlN pomocou Maxwellovho a Agrawalovho modelu. Porovnajte výsledky s experimentálnymi údajmi a diskutujte presnosť modelu.

Zadanie - Vstupné parametre

- Tepelná vodivosť polyuretánu (matice): $k_p = 0.2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- Tepelná vodivosť nanočastic AlN: $k_f = 200 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- Korekčný faktor pre Agrawalov model: $\xi = 0.8$
- Objemové frakcie nanočastic (ϕ_f): 0%, 5%, 10%, 20%, 30%

Experimentálne údaje

ϕ_f (%)	$k_{\text{eff_exp}}$ ($\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
0	0.211
5	0.230
10	0.262
20	0.322
30	0.444

Tabuľka 1: Experimentálne hodnoty tepelnej vodivosti pre rôzne objemové frakcie.

Postup

1. Vytvorte tabuľku v tabuľkovom procesore (Excel/Google Sheets) s nasledujúcimi stĺpcami:
 - ϕ_f (%)
 - $k_{\text{eff_Maxwell}}$ ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
 - $k_{\text{eff_Agrawal}}$ ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
 - $k_{\text{eff_exp}}$ ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
2. Vypočítajte k_{eff} pre každú ϕ_f pomocou **Maxwellovho modelu** (1). *Poznámka:* Maxwellov model je platný len pre $\phi_f < 50\%$.
3. Vypočítajte k_{eff} pre každú ϕ_f pomocou **Agrawalovho modelu** (2).
4. Vytvorte **graf** závislosti k_{eff} od ϕ_f . Zobrazte všetky tri krivky (Maxwell, Agrawal, experiment) v jednom grafe.
5. Diskutujte:
 - Ktorý model lepšie sedí s experimentálnymi údajmi? Prečo?
 - Aký vplyv má korekčný faktor ξ na Agrawalov model?
 - Prečo Maxwellov model nepresne predpovedá k_{eff} pre vysoké ϕ_f ?

Vypracovanie

Graf by mal zobrazovať závislosť efektívnej tepelnej vodivosti (k_{eff}) od objemovej frakcie nanočastíc (ϕ_f). V grafe zobrazte tri krivky: Maxwellov model, Agrawalov model a experimentálne hodnoty.

Otázka

Ak by nanočastice AlN mali tvar **vlákien** (nie guľôčok), ako by sa zmenil Agrawalov model?

Poznámka

Tepelná vodivosť matice a nanočastíc ako aj ich typ sa môže meniť v závislosti od použitej vzorky. Aktuálne parametre poskytnú cvičiaci.