



Autor: **Bc. Evgenii Zhulitov**  
Název: **Simulace provozu sálavých panelů, určených primárně pro vytápění, v režimu chlazení**  
Vedoucí: **Ing. Jindřich Boháč, Ph.D.**  
Oponent: **Ing. Petr Zelenský, Ph.D.**

## Zadané téma

Podle zadání měl diplomant provést rešerši výrobků (sálavých panelů) dostupných na trhu se zvláštním zaměřením na ty, u kterých výrobci udávají možnost provozu v režimu chlazení. V rámci praktické části diplomové práce měl diplomant navrhnout numerický experiment, ve kterém měl s využitím metody počítačové mechaniky tekutin (CFD) vyhodnotit funkci sálavých panelů jak z hlediska jejich primárního zaměření na vytápění, tak z hlediska chlazení. Výsledky studie měl diplomant porovnat s údaji od výrobců panelů. Součástí řešené problematiky měla být část zabývající se rizikem kondenzace vodních par na povrchu panelu při režimu chlazení.

Téma považuji za důležité pro rozšíření teoretických i praktických poznatků o možnostech simulací sálavých panelů v režimu vytápění i chlazení, které umožní jejich efektivnější modelování v CFD simulacích vnitřního prostředí a podpoří tak využití metody CFD v praxi.

Metoda CFD modelování a simulace je vhodná pro řešení zkoumaného problému a klade na diplomanta nároky přiměřené absolventovi magisterského studia strojní fakulty.

## Obsah práce

Předložená diplomová práce má celkem 134 stran, kdy 58 stran tvoří úvodní kapitoly a teoretická a praktická část diplomové práce. Zbýlých 76 stran tvoří grafické přílohy.

V úvodní části diplomové práce autor stručně uvádí řešenou problematiku a vymezuje základní cíl práce, tj. provedení simulační studie sálavých panelů v režimu vytápění a chlazení. Dále podrobně popisuje jednotlivé kroky abstrakce úkolu/objektu, konkrétně i) zadání, ii) funkční model, iii) fyzikální model a iv) matematický model. Kapitola 6 je zaměřena na popis zkoušky tepelného výkonu sálavého panelu dle normy ČSN EN 14037-2. V kapitole 7 autor v teoretické rovině diskutuje problém kondenzace vodních par na povrchu sálavých panelů v režimu chlazení. Následující dvě kapitoly diplomové práce jsou věnovány tvorbě modelu sálavého panelu pro CFD simulace a prezentaci výsledků simulací. V rámci provedené studie bylo řešeno osm případů – dva typy sálavých panelů o dvou šířkách každého z nich v režimu vytápění a v režimu chlazení. Výsledky simulací byly porovnány s údaji od výrobců vybraných panelů. V závěru práce jsou shrnuty nejdůležitější získané poznatky a doporučení autora pro navazující numerické studie.

Diplomant zpracoval numerickou studii zaměřenou na stanovení tepelného a chladicího výkonu čtyř různých sálavých panelů. Získané výsledky vyhodnotil, prezentoval a porovnal s údaji od výrobců.

## Závažné připomínky k práci

Text práce obsahuje velkou řadu gramatických a stylistických chyb, některé věty a celé pasáže jsou velmi nesrozumitelné. V práci se čtenář poměrně obtížně orientuje.

Řada kapitol, které autor do diplomové práce zařadil, obsahuje informace, které jsou pro řešení dané problematiky nadbytečné. V některých případech jsou informace umístěny zmatečně. Například v kapitole „Fyzikální model“ autor uvádí způsob řešení přenosu tepla konvekcí pomocí kritériálních rovnic, což nesouvisí s použitou metodou CFD. V kapitole 6 (Zkouška tepelného/chladicího výkonu sálavého panelu) autor diskutuje metodu měření výkonu, která je používána při experimentech, včetně přepočtu naměřených hodnot na barometrický tlak. Tato informace do diplomové práce zaměřené na CFD simulace nepatří.

Autor do zbytečného detailu uvádí matematické vztahy, které následně nepoužívá. Například v kapitole 5 podrobně diskutuje jednotlivé rovnice modelu turbulence  $k-e$  RNG a uvádí parametry daného modelu. Takováto diskuze by byla vhodná, pokud by zadaný úkol blíže souvisel s daným modelem turbulence. Autor tento model pouze volí při výpočtu v ANSYS Fluent.

Velmi závažným nedostatkem je dle mého názoru absence rešeršní části diplomové práce. Součástí zadání diplomové práce bylo provést rešerši výrobků (sálavých panelů) dostupných na trhu se zaměřením na panely, které je možné provozovat v režimu chlazení. Diplomová práce neuvádí žádnou informaci o výsledcích rešerše a není proto možné posoudit, zda byla provedena. Autor zmiňuje pouze dva typy sálavých panelů firem Kotrbatý a Zehnder a to až v části diplomové práce zaměřené na vyhodnocení výsledků. A ani zde nejsou panely správně popsány a identifikovány (v případě panelů Kotrbatý se pravděpodobně jedná o panely typu KSP, ne KPS), nehledě na absenci reference. Bylo by vhodné doplnit např. odkaz na stránky výrobce, kde by bylo možné nalézt bližší informace o daných výrobcích.

V praktické části diplomové práce jsem shledal řadu závažných nedostatků. Některé pasáže jsou nesrozumitelné a nepodařilo se mi rozklíčovat, co se autor snaží sdělit. Například na straně 45 (podkapitola „Teplota vstupní vody“) není jasné, jakým způsobem byla teplota vstupní vody do potrubí vypočítána. Jednotlivé kroky nejsou dostatečně popsány. Není vůbec jasné, jakým způsobem autor získal konečnou teplotu vody pro celý panel na základě rovnic 8.2 až 8.4 a 6.2, což jsou rovnice pro výpočet měrné tepelné kapacity a měrné entalpie vody (viz uvedený „první krok“). Autor také dostatečně nevysvětlil, proč zmenšuje výkon jednotlivých trubek registru o 5 % a iterativně přepočítává teplotu na začátku potrubí (viz uvedený „třetí krok“).

Ve stejné podkapitole autor uvádí následující dvě tvrzení:

- „Tento model má omezení, která neumožňují plně simulovat režim vytápění a chlazení.“ – není jasné jaký model (pravděpodobně CFD úloha) a jaká omezení.
- „Kromě toho bylo v průběhu práce zjištěno, že model splňuje konvergenční podmínky, avšak má tendenci nadhodnocovat teplotu, což vede k odlišným výsledkům.“ – není jasné, od čeho se výsledky liší (pravděpodobně od údajů od výrobců) a o kolik.

Při kontrole výpočetních modelů na přiloženém CD jsem zjistil chyby v geometrii, kdy se zóna vzduchu nad sálavým panelem ve všech modelech překrývá se zónou izolace. Tj. v jednom místě výpočetní úlohy jsou dva kolidující materiály (vzduch a izolace). Je otázkou, jaký měla tato chyba vliv na konvergenci úloh a výsledky simulací.

Z diplomové práce je patrné, že se autor snaží upravovat okrajové podmínky výpočetních úloh tak, aby výkony panelů ze simulací souhlasily s hodnotami, které uvádí výrobci vybraných sálavých panelů. Tento postup není vhodný a v praxi není použitelný. Úkolem diplomanta bylo ověřit, zda tepelný a chladicí výkon sálavých panelů z CFD simulace souhlasí (nebo se blíží) hodnotám od výrobců. Úkolem nebylo na základě známých hodnot kalibrovat model, který bude souhlasit s podklady od výrobců. Okrajové podmínky úlohy jsou dány teplotou na vstupu do první trubky a hmotnostním průtokem vody. Ze simulace následně vyjde teplota na konci poslední trubky. Po ukončení simulace je nutné ověřit, zda střední teplota panelu souhlasí s příslušnou normou a následně je možné vyhodnotit výkon sálavého panelu a porovnat ho s údaji od výrobců. Tímto způsobem by bylo ověřeno, že metoda je univerzální a může být obecně použita při simulaci sálavých panelů různých rozměrů, nových typů apod. **Autor by si měl uvědomit, že nevdá, pokud se výsledky provedených simulací liší od hodnot od výrobců. Jeho úkolem bylo provést kvalitní CFD studii, správně výsledky vyhodnotit a odhalit možné nedostatky CFD simulací tak, aby další řešitelé měli představu o možné odchylce výsledků.**

Prezentace výsledků simulací formou řady tabulek je velmi obtížně pochopitelná. V diplomové práci nejsou dosažené výsledky dostatečně diskutovány. Zaokrouhlení vyhodnocených teplot na tři desetinná místa není vhodné. Diplomová práce obsahuje 76 stran grafických příloh z ANSYS Fluent, které zobrazují teplotní pole v jednotlivých úlohách. Tyto přílohy nejsou doplněny dostatečným komentářem a není jasné, co na nich autor chtěl demonstrovat.

Autor porovnává výsledky simulací s dvěma typy sálavých panelů výrobců Kotrbatý a Zehnder a konstatuje, že se výsledky blíží ve většině případů panelům Kotrbatý a v některých případech se liší od hodnot udávaných firmou Zehnder. Není však jasné, zda je toto úspěch. Autor totiž neuvádí, na jakém základě vytvořil numerické modely panelů, které použil v CFD simulacích. Jednalo se o modely reálných výrobků dle výrobní dokumentace některého z uvedených výrobců? Nebo je geometrie panelu převzata z normy? Bylo by vhodné vytvořit numerický model panelu, který by se shodoval s panelem některého z výrobců (např. Zehnder, či Kotrbatý) a dosažené výsledky následně porovnávat s údaji pro příslušný panel. Tj. použít stejný panel v simulaci i při experimentálním měření.

Autorovo závěrečné tvrzení: „Co se týká simulace vytápění, tak tady je nutně další rozvoj CFD kódů.“ nedává v daném kontextu smysl. Na základě provedené studie není možné usuzovat, že dalším krokem je rozvoj CFD.

Autorův závěr, že odchylka simulace od podkladů výrobců sálavých panelů by měla být vyřešena korekcí použitého modelu turbulence, je dle mého názoru zcestná. Modely turbulence se během CFD výpočtů běžně nekorigují. Bylo by spíše vhodné provést výpočty s jinými modely turbulence (další dva modely  $k-\varepsilon$  a model  $k-\omega$ ).

## Méně závažné nedostatky

Autor nedodrží všeobecně používanou terminologii a v diplomové práci uvádí řadu nepřesností. Například následující:

- Na rozhraní dvou látek dochází k přestupu tepla, ne k prostupu tepla (str. 15).
- Nutnou podmínkou vzniku konvekce není změna teplotního gradientu, ale pouze teplotní gradient (str. 16)
- Zákon zachování hybnosti je v ANSYS Fluent vyjádřen pomocí pohybových rovnic, ne pomocí rovnice hybnosti (str. 19).
- V rovnici 5.15 představuje veličina  $T$  střední hodnotu teploty, vzniklou po aplikaci Reynoldsova rozkladu teploty na střední a flukuační složku. Nejedná se o měrnou teplotu (str. 21).
- Vlastností polyuretanu není součinitel tepelné propustnosti, ale součinitel tepelné vodivosti (str. 37).
- Nepoužívá se termín subrelaxační parametry, ale podrelaxační faktory (str. 50),

V soupisu použitých značek jsou u veličin turbulence  $k$  a  $\varepsilon$  uvedeny chybné jednotky (nejedná se o bezrozměrné veličiny).

Na straně 17 uvádí autor součinitel sálání dokonale černého tělesa a neuvádí jednotky dané konstanty. Jednotky nejsou uvedeny ani v seznamu použitých značek.

Na straně 33 autor uvádí následující tvrzení: „Pokud je povrchová teplota panelu a teplota rosného bodu menší nebo rovna 2 K, teplota vody dodávané do panelu zůstává nezměněna, ale spotřeba vody klesá.“ Není jasné, co tím míní.

Na straně 35 až 37 autor zobrazuje čtyři modely zkušební komory z 3D objemového modeláře. Obrázky jsou prakticky stejné, je zbytečné je takto v diplomové práci uvádět.

Na straně 37 autor uvádí, že model sálavého panelu byl vytvořen dle obrázku 3-1 a prezentuje několik obrázků z 3D objemového modeláře. Samostatně ukazuje jednotlivé součásti sálavého panelu, tj. model izolační vrstvy, model vzduchové mezery, model hliníkového korpusu a model vody v potrubí, což je zbytečné. Všechny součásti panelu jsou patrné z posledního z obrázků (obr. 8-9), kde je zobrazen celý model sálavého panelu. Do obrázku 8-9 by stačilo doplnit vztahy a jednotlivé části modelu popsat. Z žádného z obrázků navíc nejsou patrné základní rozměry modelovaných panelů, jako je rozteč trubek, výška izolace, tloušťka plechu. Tyto informace nejsou uvedeny ani v textu diplomové práce. Bylo by vhodné doplnit do diplomové práce technické výkresy s rozměry panelů.

Výpočet hmotnostního průtoku vody potrubím uvedený na str. 44 je chybný. Uvedený vzorec vede k výpočtu rychlosti proudění v potrubí na základě známého Reynoldsova čísla. Hmotnostní průtok je nutné dále vypočítat z průřezu potrubí a hustoty tekutiny. Při dosazení hodnot, které autor ve vzorci uvádí, nevychází uvedený hmotnostní průtok.

Výpočetní síť numerických modelů by bylo vhodné doplnit vrstvou prismatických buněk v oblasti mezní vrstvy u vnějšího povrchu trubkového registru.

Na straně 51 autor zmiňuje konvergenci úloh při simulacích sálavých panelů v režimu chlazení po 700 iteracích. To je dle mého názoru nedostatečný počet provedených iteračních kroků a nemusí vést ke spolehlivému ustálení úlohy, přestože rezidua mohou poklesnout pod požadované hodnoty. Bylo by vhodnější provést řádově tisíce iteračních kroků, stejně jako v úlohách pro režim vytápění.

V části diplomové práce, která uvádí použitou literaturu, nedodrží autor formátování jmen autorů. Některá příjmení jsou napsána pomocí kapitálek, některá pouze s velkým prvním písmenem. Křestní jména jsou v některých případech zkrácena na iniciálu, v některých případech uvedena celá. Formátování roku vydání je také nekonzistentní. V některých případech je rok vydání uveden za jmény, v některých případech až na konci reference. Je evidentní, že autor nepoužívá ucelený styl referencí.

Reference [14] není úplná. Není jasné, o jaký montážní návod firmy Kotrbatý se jedná, chybí např. odkaz na webovou stránku. Navíc reference není použita v diplomové práci. I když se pravděpodobně jedná o referenci k obrázku na str. 12, viz níže.

Reference pod obrázkem na straně 12 není správná. Reference odkazuje na publikaci Turbulence – Modelování proudění. Pravděpodobně se jedná o odkaz na referenci Kotrbatý – Montážní návod (reference č. 14).

Na straně 29 autor zmiňuje možnost použití modelu UVUTUP pro řešení kondenzace vodních par. V diplomové práci ovšem schází jakákoliv reference na tento model. Není proto jasné, odkud autor danou informaci čerpal.

### **Doporučení pro rozpravu**

1. Žádám diplomanta, aby podrobně vysvětlil, jakým způsobem nastavuje teplotu vody na vstupu do jednotlivých trubek registru sálavého panelu. Tj. aby rozvedl postup uvedený na straně 45 (podkapitola Teplota vstupní vody), který není z diplomové práce jasný. Žádám diplomanta, aby vysvětlil, proč iterativně zmenšoval výkon jednotlivých částí registru o 5 % (viz třetí krok).
2. Žádám diplomanta, aby upřesnil, jakým způsobem byl ze simulací vyhodnocen tepelný a chladicí výkon sálavých panelů. Dále žádám diplomanta, aby pro jeden vybraný panel vyhodnotil a přehledně prezentoval konvektivní a radiační složku tepelného a chladicího výkonu.

### **Celkové hodnocení**

Práce obsahuje velkou řadu gramatických a stylistických chyb, některé věty a celé pasáže jsou zcela nesrozumitelné. Diplomant se dopustil řady věcných chyb, diplomová práce obsahuje mnoho nepřesností, některé informace uvedené v závěru práce jsou zcestné. Zadáání práce nebylo dle mého názoru splněno.

- Zcela chybí rešeršní část práce zaměřená na sálavé panely dostupné na trhu.
- Autor srozumitelně nevysvětlil postupy, které použil při řešení zadaných úkolů a v řadě případů tak není možné posoudit, zda postupoval správně. Dosažené výsledky nejsou dostatečně diskutovány a jejich prezentace formou tabulek a mnoha grafických výstupů v příloze diplomové práce je velmi nepřehledná.
- Autor dle mého názoru neprovedl simulaci sálavých panelů, která by mohla být využita dalšími řešiteli. Je patrné, že se snažil upravovat okrajové podmínky výpočetních úloh tak, aby výkony panelů ze simulací souhlasily s hodnotami, které uvádí výrobci vybraných sálavých panelů (kalibroval výpočetní model).

Navrhuji celkové hodnocení

**F (nedostatečně).**

V Praze 9. srpna 2021

Ing. Petr Zelenský, Ph.D.