

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Modelování a simulace

Teplárenství

5. prosince 2022

Vladislav Mikheda
Vladislav Khrisanov

Obsah

1	Úvod	2
1.1	Zdroje faktů	2
1.2	Ověření validity	2
2	Shrnutí podstatných faktů	2
2.1	Použité postupy	3
2.2	Původ použitých metod	3
3	Koncepce. Způsoby řešení	3
3.1	Cíl modelu	3
3.2	Struktura modelu	3
3.3	Realita	3
3.4	Zjednodušení reality pro model	5
3.5	Popis konceptuálního modelu	6
3.6	Formy koncepce	6
4	Architektura simulačního modelu	7
4.1	Popis částí programu	8
4.2	Spuštění modelu	8
5	Experimentování	8
5.1	Postup experimentování	8
5.2	Jednotlivé experimenty	9
5.2.1	Experiment 1	9
5.2.2	Experiment 2	9
5.3	Závěry experimentů	9
6	Závěr	14

1 Úvod

Jedním z akutních problémů spojených se skutečným snížením počtu dostupných zdrojů je efektivní vytápění domácností, jehož řešení se skládá ze dvou hlavních částí:

1. Využití alternativních zdrojů energie
2. Kvalitní tepelná izolace budov

Někteří výrobci izolačních technologií přitom tvrdí, že jejich izolace umožňuje snížit spotřebu energie až o 80%[8] v případě již postavených domů a je zřejmé, že pokud platí tato tvrzení, pak je kvalitní izolace klíčovou součástí řešení zkoumaného problému. Z tohoto důvodu bylo cílem této práce zvoleno ověření výše uvedeného tvrzení.

Kromě toho existují dotační vládní programy jako je například program Nová zelená úsporám zaměřený na úspory energie v rodinných a bytových domech, který může obecně pokrýt až 50% z celkových výdajů na izolaci a výměnu zdrojů tepla[5]. V případě stanovení, že účinnost moderní tepelné izolace je opravdu tak velká, mohla by být tato práce motivací pro lidi k renovaci jejich domovů.

Výsledkem bylo vytvoření modelu[7, snímek 7] domu s možností nastavení potřebných vlastností izolace a vlastností samotné stavby pro zjištění poměru výroby tepla ke ztrátám při udržování zvolené teploty, což dovoluje určit skutečnou účinnost vybraných izolačních technologií s dostatečně vysokou přesností.

1.1 Zdroje faktů

Na projektu pracovali studenti FIT VUT v Brně: Vladislav Mikheda(xmikhe00) a Vladislav Khrisanov(xkhris00). Jako zdroje byly použity učebnice fyziky a oficiální informace o materiálech, izolacích a zdrojích tepla od výrobců.

1.2 Ověření validity

Správnost[7, snímek 37] chování jednotlivých komponent modelu(např. množství tepla ztraceného stěnou se specifickými vlastnostmi za určitých podmínek) bylo testováno porovnáním se skutečnými referenčními údaji z několika různých zdrojů.

2 Shrnutí podstatných faktů

Model je postaven na známých fyzikálních zákonech:

- Hlavním jevem je přirozený přenos tepla, který spočívá v samovolném přenosu tepla z teplejšího těla do méně teplého těla(druhá věta termodynamiky)[4].
- Rychlost přenosu tepla do méně teplého těla(například tepelné ztráty přes zeď nebo okno v důsledku nízké venkovní teploty) závisí na fyzikálních parametrech teplejšího těla, jako je tepelná vodivost, tloušťka nebo tvar(záleží v případě střechy)[4].
- Podle výrobců mají moderní izolační materiály nízkou tepelnou vodivost, což umožňuje zpomalit únik tepla z místnosti, což zase vede ke snížení nákladů na energii[8].
- Radiátor má také své vlastní parametry, jako je výrobní materiál, koeficient(součinitel) přestupu tepla[4] a plocha jeho povrchu.
- Pro ohřev se horká voda pohybuje uvnitř radiátorů, zatímco jeho stěny z ní dostávají teplo (zahřívají se). Stěny radiátoru pak dodávají teplo do vzduchu vytápěné místnosti. Toto je zjednodušená, ale dostatečná verze procesu vytopení pro náš úkol[4][13].

2.1 Použité postupy

Fyzikální vzorce popisující výše uvedené jevy byly transformovány do rovnic podle hledaných hodnot, pak byl vytvořen simulační model[7, snímek 44] v C++, který reprezentoval procházející fyzikální procesy pomocí systémů odpovídajících rovnic[7, snímek 51].

2.2 Původ použitých metod

Model popsany rovnicemi patří klasifikaci modelů podle Fichwicka[7, snímek 46].

3 Koncepce. Způsoby řešení

Cílem projektu je důkaz hypotézy zmíněné v sekci 1. Pro dosažení tohoto cíle je nutné navrhnout konceptuální model[7, snímek 54] domu. Z rozboru tohoto tématu plyne že je nutné namodelovat všechno co souvisí se systémem topení domu a tepelnými vlastnostmi budovy.

3.1 Cíl modelu

Jako cíle návrhu modelu byly zvoleny:

- Vliv teploty vody pro vytápění domu na rychlost ohřevu radiátoru.
- Vliv rychlosti ohřevu radiátoru v místnosti na teplotu v místnosti.
- Vliv venkovní teploty na teplotu v domě.
- Vliv materiálu a tloušťky stěn a střechy na odvod tepla z domu.
- Vliv vypnutí radiátoru na změny teploty v místnosti a teplotu vody v radiátoru.
- Vliv změn průměrné teploty v domě na teplotu v místnosti.

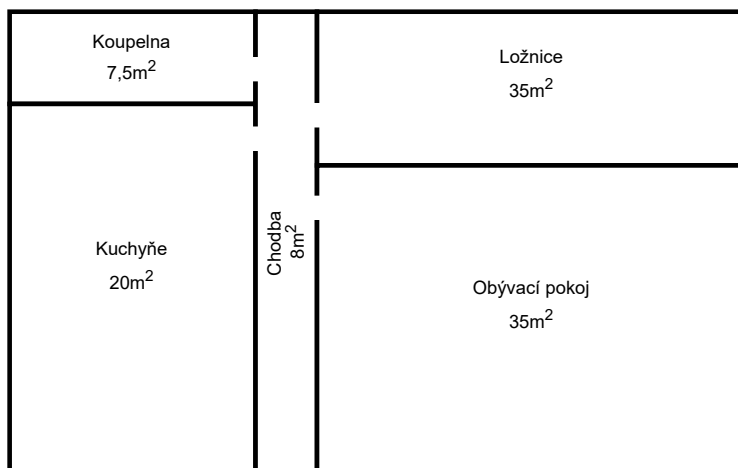
3.2 Struktura modelu

Pro dosažení cílů modelu je nutné promyslet strukturu[7, snímek 67] modelu. Struktura modelu bude reprezentována budovou, ulicí a tepovými procesy mezi nimi. Dům bude ovlivněn faktory, jako systém vytápění, který zjišťuje ohřev domu a chlazení budovy, které je přenosem tepla do ulice. Tyto procesy ohřevu a chlazení budou záviset na faktorech topného systému, teplotě venkovního vzduchu a tepelných vlastnostech budovy. Pro realizaci modelu je nutné mít představu založenou na realitě.

3.3 Realita

Článek ze kterého byly převzaty informace o projektu[8], popisuje dům o rozloze 88 metrů čtverečních. K vytvoření modelu je potřeba více informací. Pro model bylo rozhodnuto vzít dům s následujícími místnostmi:

- Kuchyň: výška stropu – 3 metrů, šířka – 4 metrů a délka – 6 metrů, plocha - 20 metrů čtverečních.
- Koupelna: výška stropu – 3 metrů, šířka – 1,5 metrů a délka – 4 metrů, plocha - 6 metrů čtverečních.
- Obývací pokoj: výška stropu – 3 metrů, šířka – 5 metrů a délka – 7 metrů, plocha - 35 metrů čtverečních.
- Ložnice: výška stropu – 3 metrů, šířka – 2,5 metrů a délka – 7 metrů, plocha - 17,5 metrů čtverečních.
- Chodba: výška stropu – 3 metrů, šířka – 1,06 metrů a délka – 7,5 metrů, plocha 8 metrů čtverečních.



Obrázek 1: plán domu

V každém pokoji kromě chodby a koupelny bude okno šířka kterého je – 1,2 metrů a výška – 2 metrů. Pro přehlednost byl navržen plán domu 1. Dále je nutné navrhnout systém topení. Vytápění domu bude realizováno pomocí plynového kotle, neboť se jedná o nejoblíbenější způsob vytápění domů v Česku[6]. Pro naše účely byl vzít model kotle IMMERGAS VICTRIX Superior[3]. Model kotle hraje roli pouze při průměrování parametrů. Výkon kotle je 15,6 litrů za minutu, maximální ohřev vody je 95 stupňů Celsia.

Po výběru kotle je nutné vypracovat jak budou uloženy topné trubky a radiátory. Jako princip pokládky potrubí bylo použito diagonální připojení a Tichelmannova smyčka (en. Tichelmann system)[1]. To umožňuje s přihlédnutím k výběru potrubí a pohybu radiátorů, získat 100% účinnost každého z nich. Průměr trubek v projektu zanedbáme. A budeme předpokládat, že radiátory jsou umístěny tak, aby poskytovaly 100% účinnost. K vytápění budou sloužit litinové radiátory, pro každou místnost je nutné spočítat počet článku podle vzorce[10]:

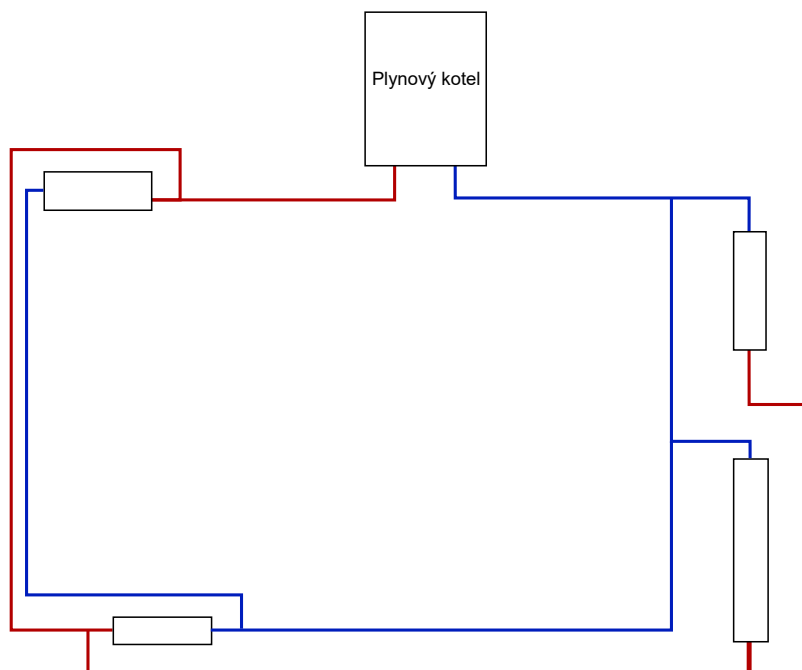
$$N = \frac{S * 100}{P}$$

N – počet článku, S – plocha místnosti, P – výkon jednoho článku.

Jako P bude zvoleno 221 W[9]. Podle formule byl zjištěn počet článků pro každou místnost.

- Kuchyň 10 článků.
- Koupelna 3 článků.
- Obývací 15 článků.
- Ložnice 7 článků.

Pro přehlednost byl navržen plán Tichelmanovy smyčky (en. Tichelmann system) 2.



Obrázek 2: plán Tichelmanovy smyčky

Poslední částí popisu reality je výběr materiálu domu. Vnější zeď je sestrojena z cihly. V článku[8] je napsáno o starých domech v Česku, většinou jsou tyto domy cihlové. Na střeše jsou betonové příčky, stropní desky a jako tepelná izolace jsou piliny. Stěny domu ještě nejsou zateplené. Střecha je zateplena, aby se alespoň trochu vyrovnal únik teplého vzduchu.

3.4 Zjednodušení reality pro model

Realita která byla zvolena jako představa je dost složitá pro naši účely a je nutné zjednodušit nebo zanedbat složité elementy.

- U místností se nebude brát v úvahu teplota sousedních místností, ale bude se zohledňovat průměrná teplota v domě.
- Konvekční proudy vzduchu nebudou brány v úvahu. Objem vzduchu v místnosti je brán jako konstantní.
- Topné trubky a jejich ohřev nebudou brány v úvahu.
- Pro jednoduchost bude plocha radiátoru vypočítána jako přibližná plocha povrchu 1 článku vynásobená počtem článků.
- Bylo rozhodnuto ponechat teplotu venku jako konstantní a měnit ji pouze v závislosti na experimentu.
- Model nezohledňuje chodbu, jelikož se jedná o nevytápěnou místnost.
- Průtok vody z plynového kotle je distribuován do všech radiátorů, které jsou nyní připojeny k systému, rovnoměrně bez ohledu na jejich objem.

Výše popsání zjednodušení jsou zavedena pro zjednodušení realizace a neovlivňují procento před a po zateplení.

3.5 Popis konceptuálního modelu

Model se skládá ze dvou procesů. První reprezentuje ohřev domu. Druhý ochlazení domu. První proces začíná tím že se spustí ohřev vody. Plynový kotel propustí vodu 0,263 litru za sekundu a ohřeje ji až na 80 stupňů (teplotu je možné měnit). Dále voda vstupuje do baterií, protože v našem modelu je k dispozici regulátor topení, baterii lze vypnout ze systému jestli teplota v místnosti je již dostatečná. Proud vody z plynového kotle je distribuován rovnoměrně do všech baterií v systému. Baterie se postupně zahřívají a v závislosti na své teplotě začnou vydávat teplo do místnosti. Z baterie vytéká studenější voda než byla na vstupu a pak jde opět do plynového kotle pro ohřev. Model zohledňuje teplotu vody, která vstupuje do plynového kotle. Při změně teploty vody vstupující do kotle, snižuje se nebo zvyšuje se spotřeba plynu na ohřev vody. Když je místnost zahřata na teplotu, která je doporučována $+2^{\circ}\text{C}$ nebo je podle přání, odpojuje se od topného systému, dokud teplota v ní neklesne o 4 stupně než je zvolená, pak se místnost začne znovu topit. Při chlazení místnosti se zohledňuje i přenos tepla radiátorem a ochlazování vody v něm.

Druhý proces zohledňuje plýtvání teplem přes stěny, okna, střechu. Což ovlivňuje teplotu vzduchu v místnosti.

Tyto dva procesy zcela popisuje model. Na základě zjištěných faktů (fyzikálních vzorců) byl sestaven algoritmus pro vytápění v domě a předpokládá se, že by měl opakovat práce skutečného topného systému s chybou pro zavedená zjednodušení.

3.6 Formy koncepce

Protože ohřev a chlazení jsou fyzikální procesy lze je popsat pomocí vzorců.

Množství energie spotřebované na ohřev vody plynovým kotlem [12][4]:

$$Q = w * c * (t_{vys} - t_{vstu})$$

- Q – spotřebované množství energie, W
- w – spotřeba vody m^3/s
- c – měrná tepelná kapacita vody, $W/\text{m}^3 * ^{\circ}\text{C}$
- t_{vys} – teplota výstupní vody, $^{\circ}\text{C}$
- t_{vstu} – teplota vstupní vody, $^{\circ}\text{C}$

Výstupní množství energie z baterie [4]:

$$Q = k * S * \left(\frac{t_{vstu} + t_{vys}}{2} - t_{mis} \right)$$

- Q – výstupní množství energie, W
- k – koeficient (součinitel) přestupu tepla, $W/\text{m}^2 * ^{\circ}\text{C}$
- S – teplosměnná plocha, m^2
- t_{vstu} – teplota vstupní vody, $^{\circ}\text{C}$
- t_{vys} – teplota výstupní vody, $^{\circ}\text{C}$
- t_{mis} – teplota místnosti, $^{\circ}\text{C}$

Množství energie procházející zdi[11]:

$$Q = \frac{t_1 + t_2}{R} * S$$

$$R = \frac{L}{\lambda}$$

- Q – ztracené množství energie, W
- R – tepelná odolnost, $m^2 * ^\circ C / W$
- $t_1 t_2$ – teplota stěny na opačných stranách, $^\circ C$
- L – tloušťka zdi, m
- λ – tepelná vodivost, $W / m * ^\circ C$

Proces chování modelu je možné popsat algoritmem:

```
for všechny pokoje : místnost do
    plynový kotel ohřál část vody;
    část ohřáté vody je rozdělena mezi pracovní baterie;
    if místnost není vytápěna na požadovanou teplotu then
        ohřívá voda vstupuje do baterie;
        baterie se zahřívá;
        vypočítá se teplota výstupní vody z baterie;
        baterie vydává teplo;
        teplo z místnosti se přenáší ven;
        spočítejte, jak teplá je místnost;
        místnost se zahřívá;
        termostat kontroluje teplotu v místnosti
        if pokojová teplota + 2 je větší nebo rovno požadované teplotě then
            vypněte topení v místnosti;
        end if
    else
        baterie vydává teplo
        baterie se ochlazuje;
        teplo z místnosti se přenáší ven;
        výpočet vytápění/chlazení místnosti;
        místnost se zahřívá a ochlazuje se;
        termostat kontroluje teplotu v místnosti;
        if pokojová teplota je menší než požadovaná teplota o 2 stupně then
            zapnuté topení v místnosti;
        end if
    end if
end for
výpočet teploty vstupní vody do plynového kotle;
```

4 Architektura simulačního modelu

Při spuštění simulace[7, snímek 33] se spustí simulační experimenty. Nejdřív se spustí simulace vytápění domu bez zateplení. Vypíše se informace o stavu modelu za simulovanou dobu (množství dodané a přijaté energie, množství energie spotřebované plynovým kotlem, celková spotřeba energie za celou dobu simulace, teploty ve

každém pokoji). Ve výchozím nastavení je modelový čas[7, snímek 21] nastaven tak, aby se doba experimentu rovnala třem hodinám v reálném životě. Data budou vypisována pro každou sekundu. Poté se provede druhá část experimentu s již zatepleným domem, data se vypíší stejně. Ve třetí části experimentu je dům s kombinovaným zateplením. Průběh experimentu je popsán dál.

4.1 Popis částí programu

V třídě `Model` je navržen algoritmus který je popsán nahoře. Třídy které odpovídají názvem jednotlivých pokojů dědí z abstraktní třídy `IRoom` a obsahují jednotlivé parametry pokojů a také metody pro výpočet plochy místnosti a teplotní odolnost materiálů. Třída `Weather` reprezentuje počasí a v případě potřeby vrátí počasí které je nastavené. Třída `HeatSource` obsahuje jednotlivé parametry plynového kotlu a metodu pro výpočet ztráty energie.

4.2 Spuštění modelu

Před spuštěním modelu musíte zkompileovat příkaz `make`. Po kompilaci lze model spustit pomocí příkazu `make run`. Model bude spuštěn podle popisu nahoře s teplotou venku 0°C pro změnu teploty je možné spustit model pomocí `make run5` model bude spuštěn s teplotou venku -5°C .

5 Experimentování

Vyrobený model s dostatečnou přesností reprezentuje vytápěný dům, lze měnit ho parametry dle potřeby a také snadně rozšiřovat (např. přidávat místnosti). Cílem zavádění tohoto modelu bylo určit skutečnou úroveň účinnosti moderních izolací.

Před zahájením hlavních experimentů byl model validován a několikrát spuštěn s různými vstupními daty. Jeho chování bylo porovnané se skutečností a existujícími fyzikálními zákony.

V experimentu je modelový čas[7, snímek 21] nastaven tak, aby se doba experimentu rovnala třem hodinám v reálném životě. Teploty pro místnosti, při kterých bude topení vypnuto, byly nastaveny následovně doporučená teplota[2] + 2°C :

- Kuchyň 20°C .
- Koupelna 22°C .
- Obývací 22°C .
- Ložnice 20°C .

Topení se znovu zapne, když teplota klesne o 4 stupně od maxima v místnosti.

5.1 Postup experimentování

Byly provedené dva experimenty při různé venkovní teplotě: 0 a -5 stupňů Celsia. Každý experiment se skládal ze 3 částí a v každé části byla použita jiná varianta zateplení.

1. První část je dům bez zateplení.
2. Druhá část je dům se zateplením od ROCKWOOL.
3. Třetí část je dům s kombinovaným zateplením, střecha je zateplena zateplením od ROCKWOOL a zdi jsou izolované zateplením od jiné firmy, které je o 50 procent levnější.

Postup:

- Nastavení vstupních dat.
- Spuštění experimentu.
- Na základě získaných dat jsou sestaveny grafy.
- Analýza dat, srovnání grafů, ukončení experimentu.

5.2 Jednotlivé experimenty

5.2.1 Experiment 1

Výsledky:

- Ztráty energie s minimální izolací jsou 57,4076 *kW*
- Ztráty energie s izolací ROCKWOOL jsou 9,86041 *kW*
- Ztráty energie s úspornou izolací jsou 16,0629 *kW*

Experiment je znázorněn na obrázcích 3 a 4.

5.2.2 Experiment 2

Výsledky:

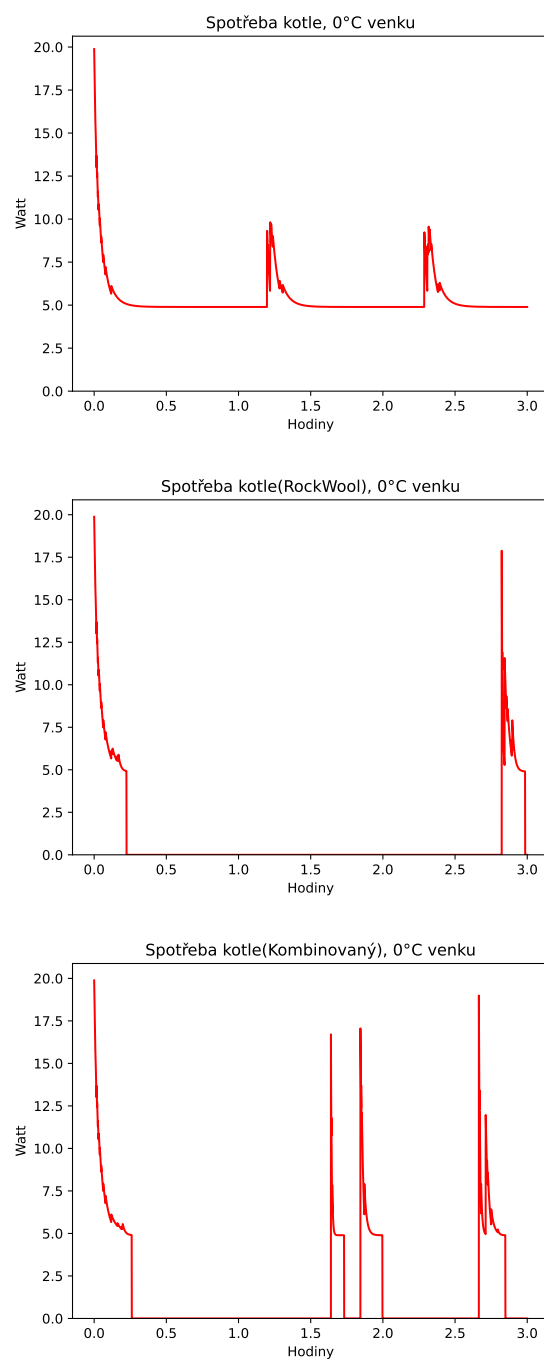
- Ztráty energie s minimální izolací jsou 54,9525 *kW*
- Ztráty energie s izolací ROCKWOOL jsou 10,2593 *kW*
- Ztráty energie s úspornou izolací jsou 20,4147 *kW*

Experiment je znázorněn na obrázcích 5 a 6.

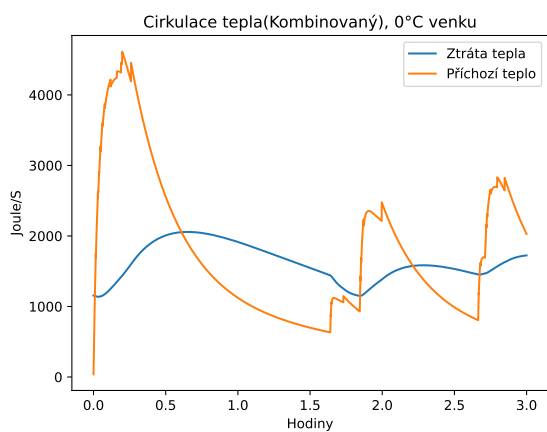
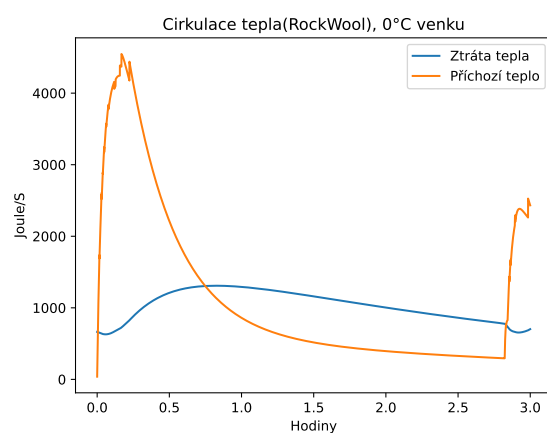
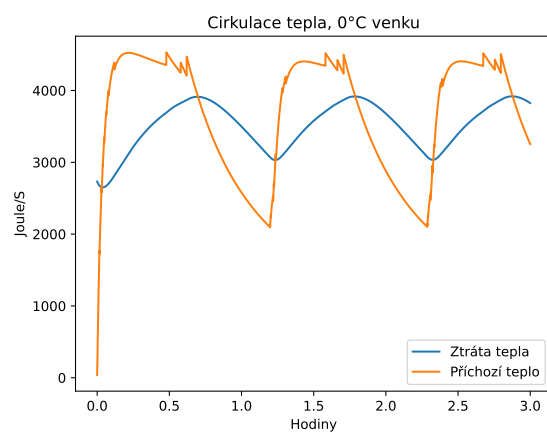
5.3 Závěry experimentů

Bylo provedeno několik experimentů při různé izolaci a venkovní teplotě a bylo zjištěno, že:

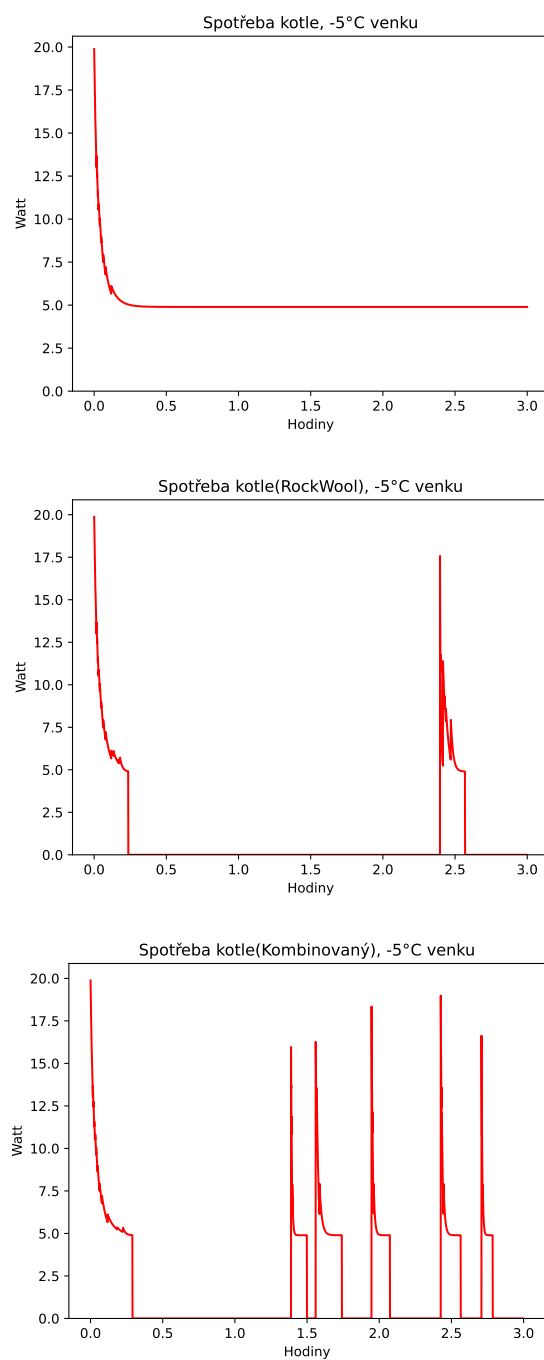
1. Především, lze prohlásit zkoumané tvrzení společnosti ROCKWOOL za platné (s ohledem na některá zjednodušení při výrobě modelu), protože se podařilo snížit výdaje ve srovnání s minimálně izolovaným domem o cca 83% při 0 °C a o cca 81% při -5 °C.
2. Z minulého závěru je jasné, že špičková izolace ROCKWOOL je navíc stabilní v rámci českého klimatu vzhledem k malému rozdílu v efektivitě při poklesu teploty.
3. Při úsporné variantě izolace bylo evidované zlepšení ve srovnání s minimálně izolovaným domem o cca 72% při 0 °C a o cca 63% při -5 °C.
4. Stabilita úsporné varianty je menší, ale stále poskytuje zlepšení o víc než 60% při nejhorší variantě, což je přijatelné v daném klimatu.
5. Při porovnání ztrát energie při různých teplotách jde vidět, že v případě minimálního zateplení, termostat má negativní vliv na úsporu energie.



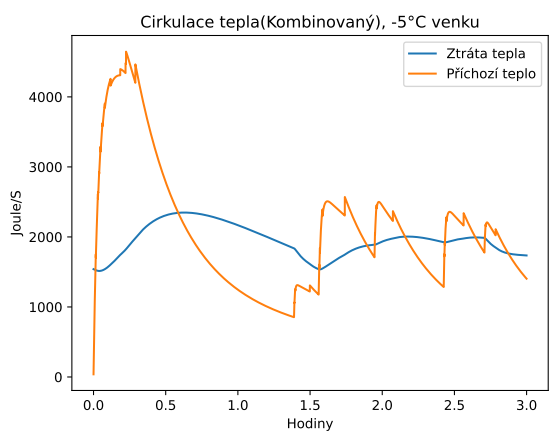
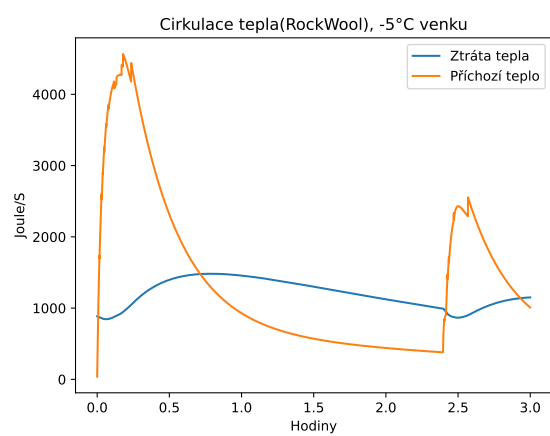
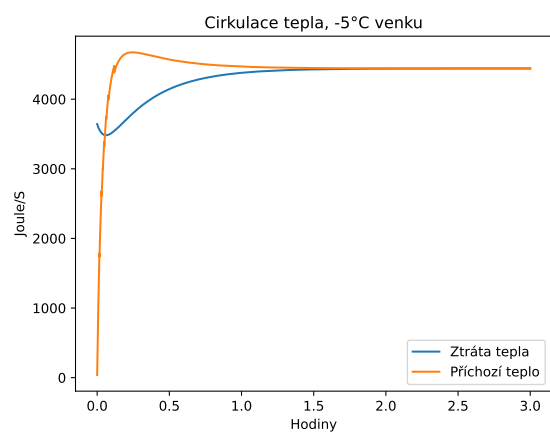
Obrázek 3: Porovnání spotřeby energie s různou tepelnou izolací, experiment 1



Obrázek 4: Porovnání generování tepla a odvod tepla, experiment 1



Obrázek 5: Porovnání spotřeby energie s různou tepelnou izolací, experiment 2



Obrázek 6: Porovnání generování tepla a odvod tepla, experiment 2

6 Závěr

Výsledky experimentů s modelem ukazují, že úvodní tvrzení je pravdivé a tento fakt má několik důležitých důsledků:

1. Kvalitní tepelná izolace je zásadní způsob, jak snížit spotřebu energie při použití jakéhokoli zdroje tepla.
2. Daný průzkum je důkazem účinnosti moderních izolačních technologií a může motivovat lidi k renovaci jejich domovů.
3. Kromě toho bylo stanoveno, že úsporné varianty moderních izolací mají také velice vysokou úroveň, což umožňuje použít tento způsob úspory energie ještě většímu počtu lidí.

Literatura

- [1] CalorTech s.r.o.: Tichelmann a jeho smyčka. [online]. [vid. 2022-12-04].
Dostupné z: <https://calortech.cz/blog/23-tichelmann-smycka>
- [2] Eon: Jaké jsou optimální teploty v místnostech. [online]. [vid. 2022-12-04].
Dostupné z: <https://www.eon.cz/radce/vytapeni-a-vetrani/usporne-vytapeni/jake-jsou-optimalni-teploty-v-mistnostech/>
- [3] Fe-MAT Hruban s. r. o: Plynový kondenzační kotel IMMERGAS VICTRIX Superior 32 X 2 Erp, pouze topný - 3.025506. [online]. [vid. 2022-12-04].
Dostupné z: <https://www.a-kotle.cz/plynovy-kondenzacni-kotel-immergas-victrix-superior-32-x-2-erp-pouze-topny-3-025506-106694.html#technical>
- [4] Hradílek, Z.; Lázníčková, I.; Král, V.: *Elektrotepelná technika*. Praha: České vysoké učení technické v Praze. první vydání. 2011. ISBN 978-80-01-04938-9.
- [5] Ministerstvo životního prostředí: Nová zelená úsporám. [online]. [vid. 2022-12-04].
Dostupné z: <https://novazelenausporam.cz/nzu-light/>
- [6] Oddělení analýz a datové podpory koncepcí: Plynové kotle. Výsledky statistického zjišťování v letech 2017 – 2019. [online]. [vid. 2022-12-04].
Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statistika/plynna-paliva/2020/5/Plynove-kotle_publicace_2019_final.pdf
- [7] Peringer, P.; Hrubý, M.: Modelování a simulace, Text k přednáškám kursu Modelování a simulace na FIT VUT v Brně. [online]. 15. 2022 září. [vid. 2022-12-04].
Dostupné z: https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/496048/mod_resource/content/1/IMS.pdf
- [8] ROCKWOOL: Dotace na zateplení domu – kolik peněz a na co se dá získat? [online]. [vid. 2022-12-04].
Dostupné z: <https://www.rockwool.com/cz/odborne-rady-a-inspirace/dotace-na-zatepleni-domu>
- [9] Tzbinfo: Tepelný výkon ocelových a litinových článkových těles. [online]. [vid. 2022-12-04].
Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/59-tepelny-vykon-ocelovych-a-litinovych-clankovych-teles>
- [10] Unansea: Výpočet Topných Radiátorů Podle Oblasti. Výpočet Radiátorů Pro Vytápění Soukromého Domu. [online]. [vid. 2022-12-04].
Dostupné z: <https://cs.unansea.com/vypocet-topnych-radiatoru-podle-oblasti-vypocet-radiatoru-pro-vytapeni-soukromeho-domu/>
- [11] Volf, I.; Jarešová, M.; Ouhřabka, M.: Přenos tepla. [online]. [vid. 2022-12-04].
Dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/texttz.pdf>
- [12] Wikipedia: Přestup tepla. [online]. [vid. 2022-12-04].
Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Přestup_teplo
- [13] Wikipedia: Radiátor. [online]. [vid. 2022-12-04].
Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Radiátor>