

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Aplikace technologie palivových článků jako zdroje
energie pro rodinný dům

Fuel Cell as a Energy Source of a Family House

Student: Petr Kubesa
Vedoucí práce: Ing. Zbyszek Szeliga, Ph.D.

Ostrava 2009

Zadání bakalářské práce

Student: **Petr Kubesa**

Studijní program: B2341 Strojírenství

Studijní obor: 3904R016 Technika tvorby a ochrany životního prostředí

Specializace: 70 Technika tvorby a ochrany životního prostředí

Téma: Aplikace technologie palivových článků jako zdroje energie pro rodinný dům
Fuel Cell as a Energy Source of a Family House

Zásady pro vypracování:

Pro danou stavbu rodinného domu proveďte základní výpočet tepelných ztrát a návrh otopné soustavy s ohledem na rozvahu možnosti aplikace palivového článku jako zdroje elektrické a tepelné energie.

Práce bude obsahovat

- řešební část ad. základy technologie palivových článků a jejich aplikace v stacionárních systémech
- stanovení potřeby tepla pro vybranou stavbu, resp. vytápěné prostory
- návrh otopné soustavy, začlenění jednotlivých zdrojů energie (s ohledem na provoz palivového článku)
- začlenění palivového článku do otopné soustavy (schéma zapojení, regulace)

Seznam doporučené odborné literatury:


- LARMINIE J. a DICKS A.: *Fuel Cell Systems Explained*, Second Edition, John Wiley and Sons Inc., Chichester, 2003, ISBN 0-470-84857-X.
- LEDJEFF-HEY.: *Brennstoffzellen*, C.F.Müller Verlag, 2000

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zbyszek Szeliga, Ph.D.**

Datum zadání: 29.09.2008

Datum odevzdání: 22.05.2009


prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 22.05.2009

.....

Petr Kubesa

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové (bakalářské) práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Petr Kubesa
Zámecká 14
Raduň, 747 61

V Ostravě 22.05.2009

.....

Petr Kubesa

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

KUBESA, P. *Aplikace technologie palivových článků jako zdroje energie pro rodinný dům*. Ostrava: Katedra energetiky, Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2009, 52 s. Bakalářská práce, vedoucí: Szeliga, Z.

Bakalářská práce je rozdělena do tří základních částí. První část obsahuje úvod do teorie technologie palivových článků včetně popisu možnosti jejich aplikace jako zdroje elektrické a tepelné energie pro rodinný dům. Druhá část práce se zabývá základním výpočtem tepelných ztrát rodinného domu včetně výpočtu potřeby tepla na vytápění a teplou užitkovou vodu. V třetí části je na základě znalosti předchozích částí vybrán vhodný typ palivových článků a navržena otopná soustava a její hlavní prvky. Do otopné soustavy je následně zařazen vybraný modul s palivovými články, který produkuje elektrickou energii, ohřívá teplou užitkovou vodu a přebytečné teplo je využíváno v otopném období pro účely vytápění.

ANNOTATION OF THESIS

KUBESA, P. *Fuel Cell as a Energy Source of a Family House*. Ostrava: Department of Power Engineering, Faculty of Mechanical Engineering VŠB - Technical University of Ostrava, 2009, 52 p. Thesis, head: Szeliga, Z.

The thesis is divided into three basic parts. In the first part, there is an introduction into the theory of fuel-cell technology that includes a description of the possibilities of their application as a source of electricity and thermal energy for family house. The second part of the thesis deals with the basic calculation of heat loss in a family house, including the calculation of the necessary amount of heat for heating and hot supply water. In the third part, which is based on knowledge from previous parts, an appropriate type of a fuel cell is chosen and the heating system and its main parts are designed. The selected module with the fuel cell is included in the heating system in order to produce electricity, heat hot supply water and excess heat is used for heating purposes in a heating period.

Obsah

POUŽITÁ OZNAČENÍ, POJMY A ZKRATKY	8
1 ÚVOD.....	11
2 PALIVOVÉ ČLÁNKY	12
2.1 ZÁKLADNÍ PRINCIP ČINNOSTI PALIVOVÉHO ČLÁNKU	12
2.2 HISTORIE PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ	14
2.3 ÚČINNOST PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ	15
2.4 SESTAVENÍ PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ	16
2.5 ZÁKLADNÍ DRUHY PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ	17
2.6 CHARAKTERISTIKA DRUHŮ PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ	17
2.6.1 <i>Palivové články s alkalickým elektrolytem - AFC</i>	17
2.6.2 <i>Palivové články s tuhými polymery - PEMFC</i>	18
2.6.3 <i>Přímé metanolové palivové články - DMFC</i>	19
2.6.4 <i>Palivové články s kyselinou fosforečnou - PAFC</i>	19
2.6.5 <i>Palivové články s roztavenými uhlíčitany - MCFC</i>	19
2.6.6 <i>Palivové články s pevnými oxidy - SOFC</i>	20
2.7 APLIKACE PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ VE STACIONÁRNÍCH SYSTÉMECH	20
3 VÝPOČET TEPELNÉ ZTRÁTY BUDOVY	24
3.1 ZÁKLADNÍ INFORMACE O BUDOVĚ.....	24
3.2 TEPELNÁ ZTRÁTA BUDOVY	24
3.2.1 <i>Skladba a označení konstrukčních prvků</i>	25
3.2.2 <i>Okna a dveře</i>	26
3.2.3 <i>Výpočet součinitele prostupu tepla k</i>	27
3.2.4 <i>Základní tepelná ztráta prostupem tepla</i>	28
3.2.5 <i>Tepelná ztráta prostupem tepla</i>	30
3.2.6 <i>Tepelná ztráta místnosti větráním</i>	32
3.2.7 <i>Celková tepelná ztráta budovy</i>	34
4 VÝPOČET POTŘEBY TEPLA NA VYTÁPĚNÍ A OHŘEV TUV.....	35
4.1 DATA OTOPNÉHO OBDOBÍ.....	35
4.2 ROČNÍ POTŘEBA TEPLA NA VYTÁPĚNÍ BUDOVY	36
4.3 DENNÍ POTŘEBA TEPLA NA OHŘEV TEPLÉ UŽITKOVÉ VODY.....	37
5 NÁVRH OTOPNÉ SOUSTAVY	38
5.1 VOLBA NÁVRHOVÝCH PARAMETRŮ VODNÍ OTOPNÉ SOUSTAVY	38
5.2 HLAVNÍ PRVKY OTOPNÉ SOUSTAVY	40

5.2.1	<i>Volba typu palivového článku</i>	40
5.2.2	<i>Volba plynového kotle</i>	41
5.2.3	<i>Volba oběhových čerpadel</i>	41
5.2.4	<i>Návrh akumulční nádrže</i>	42
5.2.5	<i>Návrh otopných těles</i>	45
5.3	POPIS FUNKCE OTOPNÉ SOUSTAVY	46
5.3.1	<i>Provoz otopné soustavy mimo otopné období</i>	47
5.3.2	<i>Provoz otopné soustavy v otopném období</i>	48
6	ZÁVĚR	49
7	SEZNAM POUŽITÝCH PRAMENŮ	50
8	PŘÍLOHY	52

Použitá označení, pojmy a zkratky

Označení	Název	Jednotka
B	- charakteristické číslo budovy	$[Pa^{0,67}]$
c	- tepelná kapacita vody	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
c_v	- objemová tepelná kapacita vzduchu	$[J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$
D	- počet denostupňů	$[K \cdot den]$
d	- počet dnů otopného období	$[1]$
e_d	- součinitel zkrácení doby vytápění	$[1]$
e_i	- součinitel nesoučasnosti tepelné ztráty	$[1]$
e_t	- součinitel snížení teploty místnosti v noci	$[1]$
\bar{g}_f	- Gibbsova volná energie na 1 mol látky	$[kJ \cdot mol^{-1}]$
\bar{h}_f	- entalpie pro oxidační reakce paliva	$[kJ \cdot mol^{-1}]$
i_{LV}	- součinitel spárové průvzdušnosti	$[m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1} \cdot Pa^{-0,67}]$
k	- součinitel prostupu tepla	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
k_c	- průměrný součinitel prostupu tepla	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
L	- délka spár otvíratelných částí oken a dveří	$[m]$
l	- tloušťka vrstvy konstrukce	$[m]$
M	- charakteristické číslo místnosti	$[1]$
n	- počet osob v budově	$[1]$
n_h	- intenzita výměny vzduchu	$[h^{-1}]$
P_{el}	- je užitečný elektrický výkon palivového článku	$[W]$
p_1	- přírážka na vyrovnání vlivu chlad. konstrukcí	$[1]$
p_2	- přírážka na urychlení zátopy	$[1]$
p_3	- přírážka na světovou stranu	$[1]$
Q_{chem}	- výkon dodaný v palivu palivového článku	$[W]$
\dot{Q}_c	- celková tepelná ztráta	$[W]$
\dot{Q}_o	- základní tepelná ztráta	$[W]$
\dot{Q}_p	- tepelná ztráta prostupem tepla	$[W]$
$\dot{Q}_{TUV,d}$	- denní potřeba tepla pro ohřev TUV	$[kJ \cdot den^{-1}]$
$\dot{Q}_{VYT,r}$	- roční potřeba tepla na vytápění	$[kWh \cdot rok^{-1}]$

\dot{Q}_v	- tepelná ztráta větráním	[W]
\dot{Q}_z	- tepelný zisk	[W]
S	- plocha ochlazované konstrukce	[m ²]
t_1	- teplota studené vody	[°C]
t_2	- teplota teplé užitkové vody	[°C]
t_e	- výpočtová teplota vnějšího prostředí	[°C]
t_{es}	- průměrná teplota topného období	[°C]
t_i	- výpočtová vnitřní teplota	[°C]
t_{is}	- průměrná vnitřní výpočtová teplota	[°C]
t_{gr}	- průměrná teplota zeminy	[°C]
t_t	- teplota topné vody	[°C]
t_v	- teplota vratné vody	[°C]
\dot{V}_{1p}	- potřeba teplé vody za 1 den na osobu	[m ³ ·den ⁻¹]
\dot{V}_{4p}	- celková potřeba teplé vody za 1 den	[m ³ ·den ⁻¹]
V_{AN}	- celkový objem akumulční nádrže	[l]
V_m	- vnitřní objem místnosti	[m ³]
\dot{V}_v	- objemový tok větracího vzduchu	[m ³ ·s ⁻¹]
\dot{V}_{vH}	- objemový tok vzduchu nuceným větráním	[m ³ ·s ⁻¹]
\dot{V}_{vP}	- objemový tok vzduchu přirozeným větráním	[m ³ ·s ⁻¹]
V'_{AN}	- předběžný celkový objem akumulční nádrže	[l]
z	- koeficient energetických ztrát systému pro TUV	[1]
α_e	- součinitel přestupu tepla na venkovní straně	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
α_i	- součinitel přestupu tepla na vnitřní straně	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
λ	- součinitel tepelné vodivosti materiálu	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
η_0	- účinnost obsluhy, možnosti regulace soustavy	[1]
η_r	- účinnost rozvodu vytápění	[1]
$\eta_{skut,pc}$	- skutečná účinnost palivového článku	[1]
$\eta_{teor,pc}$	- teoretická účinnost palivového článku	[1]
ρ	- hustota vody	[kg·m ⁻³]
τ	- čas	[h]

Použité pojmy a zkratky

Fuel cell	- anglický překlad termínu „palivový článek“
Fuel cell stack	- palivové články seřazené do celku
Gibbsova volná energie	- udává množství energie, která je přeměnitelná na vnější, užitečnou, elektrickou práci vztaženou na 1 mol látky
Infiltrace	- přirozená výměna vzduchu netěsnostmi okenních spár
Kogenerace	- společná výroba elektrické energie a tepla
Reforming	- vysokoteplotní rozklad látky, nejrozšířenější výroba vodíku ze zemního plynu
AFC	- alkaline electrolyte fuel cell
AN	- akumulční nádrž
DMFC	- direct Metanol Fuel Cell
MCFC	- molten carbonate fuel cell
NASA	- National Aeronautics and Space Administration
PAFC	- phosphoric acid fuel cell
PEMFC	- proton exchange membrane fuel cell
PPM	- parts per million
SOFC	- solid oxid fuel cell
TUV	- teplá užitková voda

1 Úvod

V posledních letech je stále více technologie palivových článků zmiňována jako jeden z perspektivních možných principů transformace energie. Zájem o tuto technologii nastal v souvislosti se zvyšováním spotřeby energie, znečišťováním životního prostředí, dále v boji proti klimatickým změnám a v neposlední řadě také v souvislosti se ztenčujícími se zásobami fosilních paliv. Do 70. let minulého století byly palivové články opomíjeny, přestože jejich historie sahá až do 19. století. Díky své vysoké účinnosti transformace energie, tj. výroby elektrické energie, a nízkých emisím se mohou stát palivové články významnou technologií pro současnost i budoucnost, která pomůže řešit energetické problémy. Palivový článek lze definovat jako zdroj elektrické energie, ve kterém probíhá přímá přeměna chemické energie v palivu na energii elektrickou. Vedlejším produktem je tepelná energie, kterou lze dále využít například k vytápění nebo ohřevu teplé užitkové vody. Ve srovnání se stávajícími technologiemi využívající fosilní paliva jsou palivové články technologií s minimálními emisemi skleníkových plynů. Je však potřeba najít také způsob výroby paliva pro palivové články, kde nedochází k znečišťování životního prostředí. Příkladem takové výroby může být získávání paliva pro palivové články (především se jedná o vodík) ve spojení s energií z obnovitelných zdrojů (větrná energie, sluneční energie, geotermální energie apod.). Nicméně je nutné vyřešit celý cyklus využití vodíku nejen jeho výrobu, ale také skladování až po konečné využití v palivových článcích, nebo použít jiné, méně problematické, palivo např. zemní plyn nebo bioplyn, které také může být po úpravě využito v určitých typech palivových článků. Mezi nedostatky palivových článků patří v dnešní době především vysoké náklady na jejich vývoj a výrobu a také nízká životnost jednotlivých dílů.

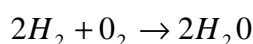
V bakalářské práci se zaměřím na základní princip a rozdělení palivových článků, dále na využití palivových článků pro potřeby domácnosti v rodinném domě. Mou snahou je najít v nabídce firem ve světě systém s palivovými články takový, který využívá jako palivo bezproblémový zemní plyn, a navrhnout jeho použití v otopné soustavě existujícího rodinného domu. Systém tak bude dodávat elektrickou energii a navíc bude využíváno odpadní teplo pro účely ohřevu vody, především teplé užitkové vody a v přebytku tepla také pro účely vytápění během otopného období v kombinaci s jiným tepelným zdrojem.

2 Palivové články

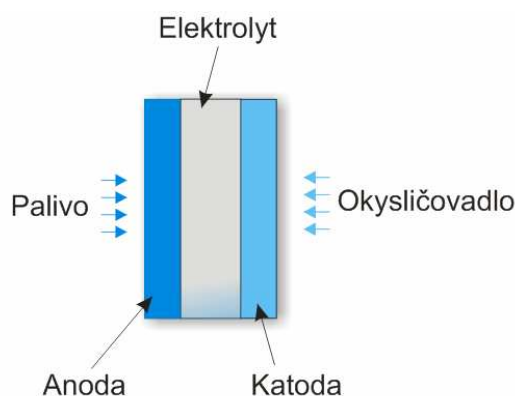
Palivové články jsou elektrochemický zdroj stejnosměrného proudu, kde elektrická energie je získávána elektrochemickou oxidací paliva a redukcí oksylichovadla. Palivové články přeměňují chemickou energii paliva přímo na elektrickou energii s vysokou účinností a jako vedlejší produkt je tepelná energie. Palivové články neprodukují velké množství znečišťujících látek. Jedinou emisí z palivových článků je voda ve formě kapalné nebo páry a nízká úroveň emisí oxidu uhličitého (nepoužívá-li palivový článek čistý vodík jako paliva).

2.1 Základní princip činnosti palivového článku

Mnoho špičkových vědeckých laboratoří už desítky let neustále pracují na zdokonalování palivových článků. Nicméně i přesto základní princip palivových článků zůstává stejný. Palivový článek pracuje na principu reakce oxidace paliva a redukce oksylichovadla. V případě základního článku využívající jako palivo vodík a jako oksylichovadlo kyslík lze říci, že princip palivového článku je, zjednodušeně řečeno, inverzní proces k elektrolýze vody, kterou lze opět z vody vodík získat. Základní chemická rovnice vodíko-kyslíkového palivového článku zní:



Základní palivový článek se skládá ze dvou porézních elektrod (katody a anody) a elektrolytu (obr. 1).



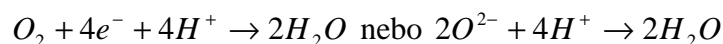
Obr. 1 - Základní konstrukce palivového článku

Na jednotlivé elektrody je přivedeno palivo a okysličovadlo. Okysličovadlem může být vzduch, neboť jak je známo obsahuje okolo 21% kyslíku. Palivem může být vodík nebo další vhodné plyny. Vodík je na anodě katalyticky přeměněn na ionty H^+ , tyto ionty putují směrem ke katodě a uvolněné elektrony jsou vedeny elektrickou zátěží směrem ke katodě a vytvářejí tak stejnosměrný elektrický proud. Na katodě dochází k redukci okysličovadla (kyslíku) na ionty O^{2-} a ty následně reagují s ionty H^+ za vzniku vody.

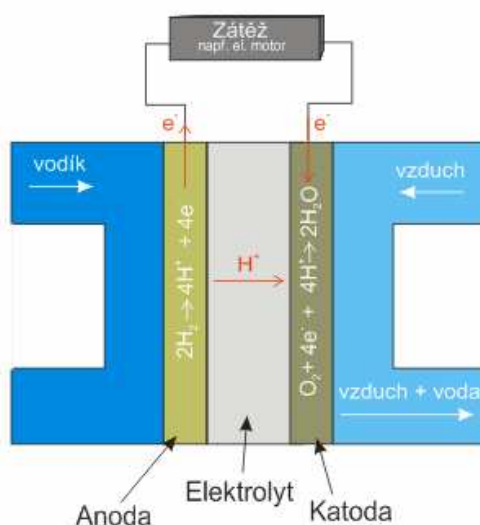
Tyto reakce můžeme zapsat ve formě chemických rovnic na jednotlivých elektrodách:



Výslednou reakci lze zapsat jako chemickou rovnici:



Na obr. 2 lze vidět chemické děje v základním palivovém článku. Konstrukce, materiálové složení, použité palivo a okysličovadlo se liší v závislosti na použitém typu palivového článku, kterými se budu zabývat později. Pro jednoduchost je uveden pouze základní princip.



Obr. 2 - Chemické děje v základním vodíkokyslíkovém článku

2.2 Historie palivových článků [2,7, 8, 9]

Za objevitele elektrochemické reakce vodíku a kyslíku při níž vzniká čistá voda je považován významný chemik Christian Friedrich Schönbeins, který tuto reakci popsal v *Philosophical Magazine* v roce 1838.

Koncepci prvního palivových článku však představil až v roce 1839 britský soudce, vědec a vynálezce sir William Robert Grove, který zjistil, že je možné vyrábět elektřinu procesem inverzním k elektrolyze pomocí palivového článku a tento článek sestrojil. Sestrojil článek, který se skládal ze dvou platinových elektrod vložených ve skleněných trubičkách a jejich dolní konec byl ponořen do roztoku kyseliny sírové, která tvořila elektrolyt, horní uzavřená část byla vyplněna kyslíkem a vodíkem.

Mezi další významné data týkající se vývoje palivových článků patří:

- **1889** - Charles Langer a Ludwig Mond použili pravděpodobně jako první termín „palivový článek” (v anglickém překladu „fuel cell”). Pokusili se sestrojit článek pracující se vzduchem a svítiplynem, což je technický plyn tvořený především směsí vodíku, oxidu uhelnatého, oxidu uhličitého a dalších plynů. Jejich článek byl však drahý a tudíž v praxi nepříliš dobře využitelný.
- **1896** - William Jacques vyvíjí první palivový článek pro domácí použití.
- **1900** - Walter Nernst jako první používá oxid zirkoničitý jako pevný elektrolyt.
- **1921** - Emil Baur zkonstruoval palivový článek s roztavenými uhlíčitany.
- **1932** - Francis Bacon přišel s prvním prakticky použitelným vodíkokyslíkovým článkem s elektrolytem tvořeným hydroxidem draselným a používající niklové elektrody.
- **1952** - měl palivový článek založený na principu článku od F. Bacona výkon až 5kW.

Praktické aplikace palivových článků přišly v 60. letech 20. století, tedy v době rozvoje vesmírných technologií. V té době použila NASA palivové články jako zdroj elektřiny pro vesmírné moduly Apollo a palivové články jsou používány v této oblasti až dodnes. V dalších desetiletích se palivové články začaly více využívat i v lodním, automobilovém, energetickém a dalším průmyslu. V dnešní době se o nich hovoří stále

více jako o možné variantě kogeneračních systémů, ve kterých mohou palivové články v budoucnu běžně sloužit jako zdroje energie pro rodinné domy.

2.3 Účinnost palivových článků [1,2]

Díky tomu, že chemická energie v palivu je přeměňována v palivovém článku přímo na elektrickou energii, můžeme dosáhnout větší účinnosti. Ta může dosáhnout u některých typů až hodnot kolem 70%. U palivových článků se maximální možná termodynamická účinnost vypočte ze vztahu:

$$\eta_{teor,pc} = \frac{\Delta \bar{g}_f}{\Delta \bar{h}_f} \quad [1] \quad (2.3.1)$$

kde $\Delta \bar{g}_f$ je změna Gibbsovy volné energie [kJ.mol⁻¹]

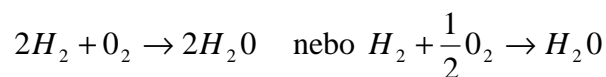
$\Delta \bar{h}_f$ je entalpie pro oxidační reakce paliv [kJ.mol⁻¹]

Gibbsova volná energie \bar{g}_f udává množství energie, která je přeměnitelná na vnější, užitečnou, elektrickou práci vztaženou na 1 mol látky.

$\Delta \bar{g}_f$ je rozdíl mezi Gibbsovou volnou energií produktu - výstupu a Gibbsovou volnou energií vstupu do palivového článku.

$$\Delta \bar{g}_f = \bar{g}_{f-produkt} - \bar{g}_{f-vstup} \quad [\text{kJ.mol}^{-1}] \quad (2.3.2)$$

Základní reakce vodíko-kyslíkového článku je



Výstupem je tedy jeden mol vody a vstupem je jeden mol vodíku a půl molu kyslíku. Pro tuto rovnici můžu napsat s ohledem na předchozí poznatek změnu Gibbsovy volné energie, která je rovna

$$\Delta \bar{g}_f = (\bar{g}_f)_{H_2O} - (\bar{g}_f)_{H_2} - \frac{1}{2}(\bar{g}_f)_{O_2} \quad [\text{kJ.mol}^{-1}] \quad (2.3.3)$$

a pro reakční entalpii $\Delta \bar{h}_f$ mohu napsat:

$$\Delta \bar{h}_f = (\bar{h}_f)_{H_2O} - (\bar{h}_f)_{H_2} - \frac{1}{2}(\bar{h}_f)_{O_2} \quad [\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}] \quad (2.3.4)$$

Výpočet Gibbsovy volné energie však ztěžuje fakt, že hodnoty této energie nejsou konstantní, protože se mění s teplotou a fází (kapalná a plynná).

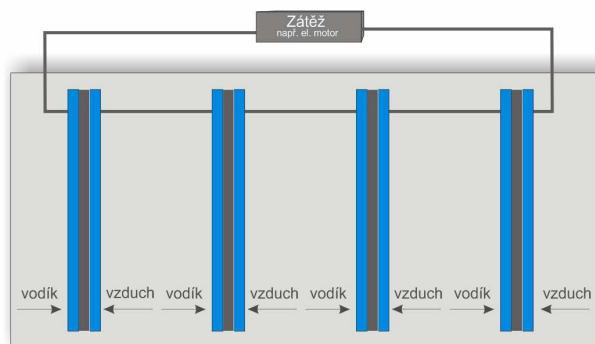
Skutečná elektrická účinnost je dána jako poměr užitečného elektrického výkonu získaného z palivového článku k výkonu dodaném v palivu a vypočte se ze vztahu:

$$\eta_{skut,pc} = \frac{P_{el}}{Q_{chem}} \quad [1] \quad (2.3.5)$$

kde P_{el} je užitečný elektrický výkon [W]
 Q_{chem} je výkon dodaný v palivu [W]

2.4 Sestavení palivových článků

Jeden palivový článek vyprodukuje malé elektrické napětí a je tedy nutné z tohoto důvodu palivové články skládat do větších celků o desítkách, stovkách nebo až tisících palivových článků. Tímto můžeme zvýšit výkon na několik wattů, kilowattů až megawattů, to má ovšem důsledek, že se výrazně zvýší finanční náklady a celková hmotnost systému. Celek s palivovými články se v zahraniční literatuře označuje jako „stack“. Řazení palivových článků do celku je možno vidět na obr. 3.



Obr. 3 - Řazení palivových článků do celku

2.5 Základní druhy palivových článků [2]

Typ palivového článku je dán především druhem elektrolytu, který je v palivovém článku použit. Na druhu elektrolytu potom závisí provozní teplota. Palivové články se na základě provozní teploty dělí na tři základní články nízkoteplotní, středněteplotní a vysokoteplotní.

- **nízkoteplotní** 60 ÷ 160 °C (palivové články AFC, PEMFC a DMFC)
- **středněteplotní** 160 ÷ 220 °C (palivový článek PAFC)
- **vysokoteplotní** 600 ÷ 1100 °C (palivové články MCFC a SOFC)

Rozdělení palivových článků a jejich základní parametry je uvedeno v **příloze č. 1**.

2.6 Charakteristika druhů palivových článků [1,2,7]

2.6.1 Palivové články s alkalickým elektrolytem - AFC

Palivový článek s alkalickým elektrolytem se řadí mezi první moderní palivové články. Jeho vývoj se datuje od roku 1960 a byl prvně využit pro aplikace v kosmonautice, ve vesmírném programu NASA Apollo a Space Shuttle. Palivové články typu AFC zde byly použity jako generátory elektrické energie a pitné vody. V poslední době je jeho vývoj zaměřen i v oblasti lodní a automobilové dopravy. Výhodou tohoto typu článku je vysoká účinnost (může dosáhnout až 70%) a provozní spolehlivost.

Elektrolytem je alkalický roztok a to především hydroxid draselný. Elektrolytem v člancích typu AFC může být také hydroxid sodný, tento má ale menší rozpustnost než hydroxid draselný a používá se jako elektrolyt minimálně. Katalyzátorem je obvykle nikl, stříbro nebo jiné drahé kovy.

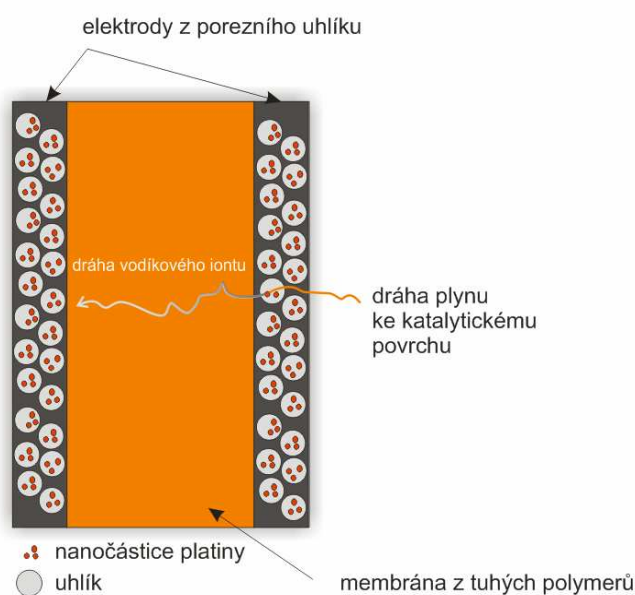
Palivem je vodík a okysličovadlem je vzduch. Závažným problémem však nastává při kontaktu elektrolytu KOH s oxidem uhličitým CO₂, který je obsažen ve vzduchu. Hydroxid draselný reaguje s oxidem uhličitým za vzniku uhličitanu draselného a

dochází ke znehodnocování elektrolytu. Proto je třeba oxid uhličitý ze vzduchu před použitím v článku vyloučit.

2.6.2 Palivové články s tuhými polymery - PEMFC

Palivové články s tuhými polymery pracují při nízkých teplotách a proto dochází k rychlejšímu najíždění na požadovaný výkon. Z toho plyne fakt, že články typu PEMFC jsou v dnešní době vyvíjeny především pro mobilní aplikace nebo v menší míře pro stacionární jednotky, kde mohou pracovat jako jednotky kogenerační. Výhodou stejně jako u článku ACF je vysoká účinnost dosahující až 68%.

Elektrolyt je kyselý, ve formě tuhé membrány, což je fólie se schopností vést ionty a zároveň plní funkci katalyzátoru. Materiál elektrolytu je z makromolekulárních řetězců a splňuje úlohu oddělení reakčních plynů. Elektroda je tvořena ve většině případů porézním uhlíkem s nanesenými malými částicemi platiny. Tyto elektrody je možno vidět na obr. č. 4. Problém u článku PEMFC nastane tehdy, jestliže se na katalyzátor dostane nebezpečný plyn oxid uhelnatý. Platinový povrch oxid uhelnatý absorbuje a následně katalyzátor se stane neaktivní. V tomto případě dojde k tzv. otravě katalyzátoru a jedná se o děj nevratný. Přípustná koncentrace CO proto musí být maximálně v jednotkách ppm, aby nedošlo k nevratnému poškození platinové membrány.



Obr. 4 - Článek PEMFC s elektrodami z porézního uhlíku [7]

2.6.3 Přímé metanolové palivové články - DMFC

Přímé metanolové palivové články jak z názvu plyne využívají jako palivo metanol (CH_3OH). Tato technologie má velkou perspektivu do budoucnosti v mobilních aplikacích, např. v automobilovém nebo i v elektrotechnickém průmyslu. S vodíkem jako palivem jsou mnohé problémy, je proto snaha hledat jiné, méně problematické, palivo. Metanol oproti vodíku má hned několik výhod. Hlavní výhodou metanolu oproti vodíku je jeho bezproblémové skladování a transport a navíc v objemové jednotce tohoto paliva je větší množství energie, než je tomu u vodíku. Nicméně i při použití metanolu jako paliva jsou mnohé problémy. Během oxidační reakce metanolu se vytváří oxid uhelnatý, který se silně adsorbuje na platinový katalyzátor a tím zmenšuje činnou plochu a snižuje výkon palivového článku. Z tohoto důvodu se přidávají do vrstvy anody další prvky jako např. ruthenium, rodium, wolfram, které tomuto negativnímu jevu zabrání. Výraznou nevýhodou tohoto typu palivového článku je jeho nízká účinnost, která se pohybuje od 20 do 30%. Konstrukce přímých metanolových palivových článků je podobná článkům PEMFC. Rozdíl těchto typů je dán především použitým palivem.

2.6.4 Palivové články s kyselinou fosforečnou - PAFC

Elektrolytem je kyselina fosforečná. Je zde jiný druh elektrolytu, než je tomu u článku AFC, a tudíž je možné použít reakční plyn s obsahem oxidu uhličitého. Článek PAFC pracuje při provozní teplotě přibližně 200°C , proto se používá tento typ palivového článku ve stacionárních jednotkách jako kogenerační zdroje tepelné a elektrické energie. Palivem je vodík a okysličovadlem je vzduch. Katalyzátorem je platina jako u typu PEMFC. Tady však díky vyšší provozní teplotě je článek tolerantnější vůči koncentraci oxidu uhelnatého. V praxi se můžeme setkat, že palivem je zemní plyn, ale to jen v tom případě, že systém je doplněn o tzv. parní reformér, který zajistí přeměnu zemního plynu na vodík. Účinnost palivového článku PAFC je poměrně vysoká a může dosáhnout až 55%.

2.6.5 Palivové články s roztavenými uhličitany - MCFC

Palivové články MCFC pracují při teplotách až 650°C , což umožňuje jejich použití v kogeneračních systémech s dodávkou tepelné energie ve vysokotlaké páře a

elektrické energie. Palivem je jak vodík tak oxid uhelnatý. Výraznou výhodou je možnost přímého využití zemního plynu jako paliva nebo jiných uhlovodíkových paliv z důvodů vnitřního reformingu paliva. Tím odpadají složité systémy na úpravu paliva. Palivové články typu MCFC mají budoucnost jako kogenerační jednotky středních až velkých výkonech (elektrárny v řádech MW). Další výhodou oproti článkům nízkoteplotních je použití levnějších kovů jako katalyzátor, např. nikl. Palivový článek typu MCFC má i několik nevýhod. Zásadní problém spočívá v korozivním elektrolytu vyžadující konstrukci z nerezových materiálů. Další nevýhodou je nutnost předpřípravy paliva. Je nutné palivo zbavit síry, neboť síra je nežádoucí, protože je katalyzátorovým jedem pro nikl. Účinnost palivového článku MCFC je také vysoká a může dosáhnout až 65%.

2.6.6 Palivové články s pevnými oxidy - SOFC

Stejně jako články MCFC patří i tyto do skupiny článků vysokoteplotních, kde provozní teplota se pohybuje v rozmezí od 800°C až 1100° a rovněž umožňuje využití článků v kogenerační zdrojích s dodávkou elektrické a tepelné energie. Palivem může být kromě vodíku také oxid uhelnatý a metan. Elektrody jsou také vyrobeny z niklu a tudíž je zde stejný problém se sírou jako u článků MCFC, která působí jako katalyzátorový jed. Protože elektrolyt je tvořen pevnými oxidy, tudíž se jedná o pevnou látku, odpadá problém s korozivním prostředím a získáváme tak výhodu oproti článkům MCFC. Pevné části článků umožňují bohaté možnosti různých geometrických tvarů, ve kterých se články mohou vyrábět.

2.7 Aplikace palivových článků ve stacionárních systémech

V současné době můžeme ve světě najít mnoho projektů, které využívají palivové články jako zdroje elektrické energie nebo kombinované zdroje elektrické energie a tepla. Jejich počet se neustále zvyšuje díky tomu, že palivové články nabízejí vysoký vývojový potenciál, nízké emise znečišťujících látek, tichý chod, snadnou přenositelnost a především vysokou účinnost přeměny energií při volbě vhodného typu palivového článku. Je třeba však výrazně zvýšit životnost důležitých částí palivových článků a naopak výrazně snížit cenu palivových článků. To by vedlo k masivnějšímu rozvoji této technologie. Protože náklady na výzkum palivových článků jsou příliš

vysoké, zabývá se jím jen několik světových firem zejména z USA, Japonska, Německa, Švýcarska, Austrálie a dalších zemí. Ve stacionárních systémech se používají v dnešní době především palivové články všech typů, kromě typu AFC a DMFC, o výkonech v řádech kilowattů až megawattů.

V rámci této práce se zaměřím na popis možnosti aplikace palivových článků o menších výkonech do domovních stacionárních kogeneračních systémů, kde se používají především dva typy palivových článků – PEMFC a SOFC. Na vývoj článků typu PEMFC vsadila společnost **Ballard Power System Inc.** Ta zavedla do stovek japonských domácností kogenerační systémy s palivovými články FCgen-1030 využívající vodík získaného ze zemního plynu. Technická specifikace palivového článku udaná výrobcem je v tab. 1.

Tab. 1 Technická specifikace palivového článku FCgen-1030 [10]

Typ	PEM (Proton Exchange Membrane)
Jmenovitý výkon	1234 W _e
Vstup	vodík
Okysličovadlo	filtrovaný vzduch
Provozní teplota	57 – 67° C
Životnost	40 000 hodin
Rozměry	343mm x 153mm x 258mm
Hmotnost	12 kg

Velkou výhodou palivových článků PEMFC je možnost rychlého najetí na jmenovitý výkon s možností dobré regulace výkonu palivového článku s ohledem na aktuální potřebu elektrické energie.

Na vývoji palivových článků typu SOFC pro obytné domy se podílí především dvě firmy, švýcarská firma Hexis Ltd. a australská firma Ceramic Fuel Cells Limited. Tyto firmy uvedly na trh kogenerační jednotky dodávající elektrickou energii a teplo pro obytné domy a kanceláře.

Hexis Ltd. se v současné době zabývá vývojem kompaktních, tichých kogeneračních jednotek s palivovými články typu SOFC pod názvem Galileo 1000 N.

Tento systém vyrábí elektrickou energii a teplo ze zemního plynu. Palivový článek pracuje při provozní teplotě 800-950 °C. Ze zemního plynu díky vnitřního reformingu se získají plyny vodíku a oxidu uhelnatého, které se používají jako palivo pro palivový článek tohoto typu. Ten následně dodává přibližně 1kW elektrické energie a 2,5 kW energie tepelné. V jednotce je navíc zabudovaný i plynový hořák o výkonu 20 kW, který zajistí pokrytí tepelné potřeby budovy. V podstatě tedy můžeme tuto jednotku porovnat s klasickými plynovými kotli s tím rozdílem, že jednotka s palivovými články kromě tepla dodává i elektrickou energii. Jednotka se skládá z několika hlavních částí, mezi něž patří modul s palivovými články (složen z 60 palivových článků), dvoukomorový tepelný výměník s přídatným hořákem, ovládací panel a měnič stejnosměrného elektrického proudu na proud střídavý. Rozmístění jednotlivých hlavních částí jednotky Galileo 1000 N je zobrazeno na obr. 5. Od roku 2001 byly jednotky Galileo 1000 N nainstalovány v přibližně 110 rodinných domech ve Švýcarsku. Technická specifikace systému je uvedena v tab. 2.



Obr. 5 - Rozmístění hlavních částí jednotky Galileo 1000 N [11]

Tab. 2 Technická specifikace Galileo 1000N [11]

Elektrický výkon palivového článku	1 kW max.
Tepelný výkon palivového článku	2,5 kW max.
Tepelný výkon přídatného hořáku	20 kW max.
Elektrická účinnost palivového článku	25 až 30 %
Celková účinnost palivového článku	90 %
Palivo	Zemní plyn
Parametry elektrického výstupu	230 V, 50 Hz
Rozměry	55 x 55 x 160 cm
Celková hmotnost	170 kg

Ceramic Fuel Cells Limited je velmi progresivní společností v oblasti vývoje palivových článků SOFC a jejich aplikací ve stacionárních systémech. Její současnou novinkou je systém pod názvem BlueGen™ (obr. 6). Jedná se o systém, který nabízí vysokou elektrickou účinnost (až 60%) a který může být upraven pro různé aplikace. Systém lze modifikovat pro dvě verze – verze dodávající pouze elektrickou energii, nebo verzi kde součástí modulu je tepelný výměník a lze dodávat elektrickou energii i teplo. Ve druhém případě je elektrický výkon palivových článků až 2 kW a tepelný výkon až 1 kW.

**Obr. 6** – Modul s palivovými články BlueGen™ [12]

Na tento modul lze napojit externí nádrž na teplou vodu. Je tedy možné jej využít jako zdroj teplé užitkové vody (TUV) nebo teplé vody na vytápění. I v tomto systému se projeví výrazná nevýhoda vysokoteplotních SOFC palivových článků a to,

že startovací čas na dosažení jmenovitých výkonů se pohybuje okolo 20 hodin, z čehož je zřejmé, že nelze příliš rychle regulovat výkon modulu, proto se tyto články hodí spíše pro konstantní pracovní podmínky. K tomuto modelu není přidán přídavný hořák na zemní plyn jako je tomu u modulu nabízeného společností Hexis Ltd., z toho důvodů je třeba do otopné soustavy přidat i jiný zdroj tepla, který pokryje potřebu teplé vody. Technická specifikace systému je uvedena v tab. 3.

Tab. 3 Technická specifikace jednotky BlueGen™ [12]

Elektrický výkon palivového článku	2 kW max.
Tepelný výkon palivového článku	1 kW max.
Elektrická účinnost palivového článku	až 60 %
Celková účinnost palivového článku	přibližně 85 %
Palivo	Zemní plyn
Elektrické parametry	230 V, 50 Hz
Rozměry	66 x 60 x 97 cm
Celková hmotnost	200 kg

3 Výpočet tepelné ztráty budovy

3.1 Základní informace o budově

Rodinný dům, pro který počítám tepelnou ztrátu a navrhuji otopnou soustavu, se nachází v obci Raduň 5 km od města Opavy, v nadmořské výšce přibližně 260 m n. m. Budova je z části podsklepena a skládá se z devíti místností. Dům je po celkové rekonstrukci, je zateplen v celém rozsahu a proběhla zde výměna starých oken za nová okna s europrofilem.

3.2 Tepelná ztráta budovy [4]

Výpočet tepelných ztrát budov při ústředním vytápění stanoví ČSN 06 0210. V této normě se počítají tepelné ztráty v jednotlivých místnostech při daných výpočtových teplotách, které se určí z tabulky A.1 a tabulky A.3 uvedené normy.

Tepelná ztráta budovy není jen prostým součtem vypočtených tepelných ztrát jednotlivých místností, protože je nutné zohlednit i infiltraci, dobu provozu jednotlivých místností a tepelné zisky. Výpočet tepelných ztrát jsem prováděl s pomocí MS Excel a tabulky výpočtů tepelných ztrát objektu jsou připojeny k práci jako příloha č. 2.

3.2.1 Skladba a označení konstrukčních prvků

Jednotlivé výpočtové konstrukční prvky rodinného domu nesou označení SO, PDL1, PDL2, PDL3 nebo SCH podle druhu a jejich složení včetně hodnot součinitelů tepelné vodivosti dle [3,5,13,14] je následující:

Venkovní stěny ochlazované s označením „SO”

- vnější vápenocementová omítka	30 mm	$\lambda_p = 0,99 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- polystyren vypěnovaný	80 mm	$\lambda_p = 0,051 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- červené cihly	450 mm	$\lambda_p = 0,44 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- vnitřní vápenná omítka	20 mm	$\lambda_p = 0,88 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Podlaha s označením „PDL1” – koupelna, kuchyň

- podlahová dlažba keramická Rako	7 mm	$\lambda_p = 1,10 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- malta cementová, cementový potěr	30 mm	$\lambda_p = 1,16 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- polystyren nepěněný tuhý	80 mm	$\lambda_p = 0,13 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- asfaltový pás	5 mm	$\lambda_p = 0,21 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- beton hutný	200 mm	$\lambda_p = 1,23 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- štěrk	100 mm	$\lambda_p = 0,93 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Podlaha s označením „PDL2” – obývací pokoj

- dřevěná podlaha	30 mm	$\lambda_p = 0,18 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
-------------------	-------	---

- malta cementová	30 mm	$\lambda_p = 1,16 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- polystyren nepěněný tuhý	80 mm	$\lambda_p = 0,13 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- asfaltový pás	5 mm	$\lambda_p = 0,21 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- beton hutný	200 mm	$\lambda_p = 1,23 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- štěrk	100 mm	$\lambda_p = 0,93 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Podlaha s označením „PDL3” – ostatní místnosti

- podlahová krytina Fatra-Termofix	2,5 mm	$\lambda_p = 0,17 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- malta cementová, cementový potěr	30 mm	$\lambda_p = 1,16 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- polystyren nepěněný tuhý	80 mm	$\lambda_p = 0,13 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- asfaltový pás	5 mm	$\lambda_p = 0,21 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- beton hutný	200 mm	$\lambda_p = 1,23 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- štěrk	100 mm	$\lambda_p = 0,93 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

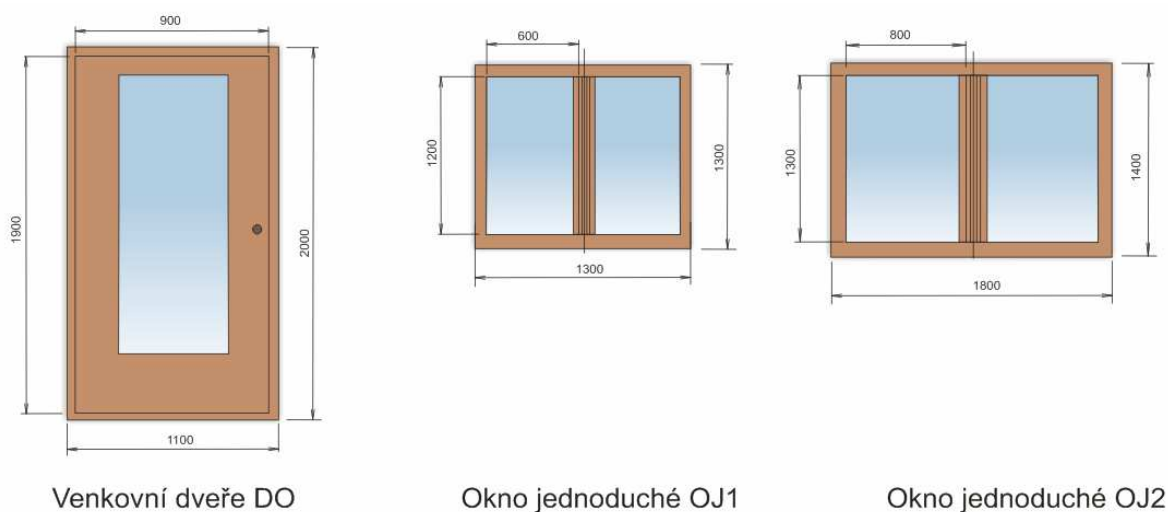
Střecha s označením „SCH”

- lepenka	2,5 mm	$\lambda_p = 0,21 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- střešní desky – měkké dřevo	20 mm	$\lambda_p = 0,18 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- polyetylenová difúzní fólie	0,6 mm	$\lambda_p = 0,35 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- tepelná izolace – skleněná plst’	250 mm	$\lambda_p = 0,046 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- polyetylenová parozábrana	0,5 mm	$\lambda_p = 0,35 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- sádrokarton	10 mm	$\lambda_p = 0,22 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

3.2.2 Okna a dveře

Okna jsou vyrobeny ze smrkového dřeva s profilem „EURO”. Rámy a křídla jsou zhotoveny z třívrstvých lepených eurohranolů. Okna jsou jednoduchá dvoukřídlová s izolačním dvojsklem. Dveře jsou také dřevěné v provedení s jedním

sklem. Základní rozměry a označení použitých venkovních oken a dveří, které využiji k výpočtu prostupu tepla a infiltrace, jsou na obr. 7.



Obr. 7 - Rozměry oken a dveří

3.2.3 Výpočet součinitele prostupu tepla

Součinitel prostupu tepla k se vypočte dle vztahu

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_e}} \quad [\text{W/m}^2 \cdot \text{K}] \quad (3.2.1)$$

kde:

k	-	součinitel prostupu tepla	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
α_i	-	součinitel přestupu tepla na vnitřní straně stěny	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
α_e	-	součinitel přestupu tepla na venkovní straně stěny	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
l_i	-	tloušťka vrstvy	[m]
λ_i	-	součinitel tepelné vodivosti jednotlivých vrstev	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]

Součinitele přestupu tepla na vnitřní a venkovní straně stanoví ČSN 73 0540-3. Dle této normy zjišťují tyto hodnoty pro součinitel přestupu tepla:

$$\alpha_e = 23 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad \text{pro vnější prostředí}$$

$$\alpha_i = 8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad \text{pro vnitřní prostředí}$$

Následuje příklad výpočtu součinitele prostupu tepla k pro stěnu „SO”. Dosazením do vztahu (3.2.1) dostanu:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_e}} = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{0,02}{0,88} + \frac{0,45}{0,44} + \frac{0,08}{0,051} + \frac{0,03}{0,99} + \frac{1}{23}} = 0,36 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$$

Další vypočtené a zjištěné hodnoty součinitele prostupu tepla pro jednotlivé výpočtové konstrukční prvky jsou uvedeny v tab. 4.

Tab. 4 Součinitele prostupu tepla pro konstrukční prvky

Označení	Součinitel prostupu tepla k [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
SO	0,36
PDL1	0,94
PDL2	0,81
PDL3	0,93
SCH	0,17
OJ1	1,40 dle [15]
OJ2	1,40 dle [15]
DO	1,50 dle [15]

3.2.4 Základní tepelná ztráta prostupem tepla

Základní tepelná ztráta \dot{Q}_o se rovná součtu tepelných toků prostupem tepla jednotlivými stěnami včetně oken a dveří, které tvoří hranici mezi vnitřním a venkovním prostředím nebo do sousedních místností. Při výpočtu zohledňuji součinitel přestupu tepla na vnitřní a venkovní straně. Všechny místnosti v dané budově jsou vytápěny, proto nebudu prostup tepla do sousedních místností uvažovat.

Základní tepelná ztráta \dot{Q}_o se počítá dle vztahu

$$\dot{Q}_o = \sum k_j \cdot S_j \cdot (t_i - t_e) \quad [\text{W}] \quad (3.2.2)$$

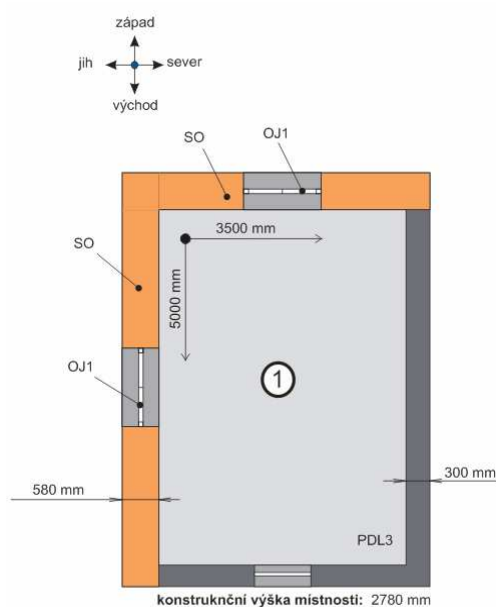
kde

k_j	-	součinitel prostupu tepla pro danou konstrukci	[$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
S_j	-	plocha dané ochlazované konstrukce	[m^2]
t_i	-	výpočtová vnitřní teplota	[$^{\circ}C$]
t_e	-	výpočtová teplota prostředí na vnější straně stěny	[$^{\circ}C$]

Jestliže je hodnota vnitřní výpočtové teploty větší než hodnota výpočtové teploty prostředí na vnější straně konstrukce, má tepelný tok zápornou hodnotu a jedná se o tepelný zisk, který zmenšuje základní tepelnou ztrátu místnosti prostupem tepla.

Příklad výpočtu základní tepelné ztráty prostupem tepla pro místnost č. 1

Místnost č. 1 se skládá z pěti konstrukčních prvků, ze dvou stěn s označením „SO”, dvou shodných oken s označením „OJ1“ a podlahy s označením „PDL3”. Uspořádání uvedených konstrukčních prvků a základní rozměry místnosti jsou zobrazeny na obr. 8. Při výpočtu prostupu tepla stěnami je třeba zohlednit otvory pro okna, tzn. že plochu stěny zmenšují o plochu oken.



Obr. 8 - Schématické zobrazení místnosti č. 1 - půdorys

K výpočtu tepelné ztráty prostupem tepla skrz konstrukční prvky je potřeba znát vnitřní výpočtovou teplotu a teplotu prostředí na vnější straně konstrukce. Podle ČSN 06 0210 je výpočtová venkovní teplota t_e průměrná teplota pěti za sebou následujících

nejchladnějších dnů podle dlouhodobých meteorologických pozorování. Pro území ČR jsou zvoleny tři základní výpočtové venkovní teploty $t_e = -12^\circ\text{C}$, $t_e = -15^\circ\text{C}$ a $t_e = -18^\circ\text{C}$. ČSN 06 0210 stanoví pro dané podmínky tyto hodnoty vnitřní a vnější výpočtové teploty:

$$\begin{aligned} t_i &= 20 && ^\circ\text{C} && \text{pro ložnici jako druh vytápěné místnosti} \\ t_e &= -15 && ^\circ\text{C} && \text{pro okres Opava} \end{aligned}$$

V případě, že stavební konstrukce nepodsklepených podlah přízemních místností přiléhá k zemině, uvažuje se s průměrnou teplotou zeminy dle ČSN 06 0210:

$$t_{gr} = 10 \quad ^\circ\text{C}$$

Dosazením do vztahu (3.2.2), dostávám hodnotu základní tepelné ztráty \dot{Q}_o pro místnost č. 1:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_o &= 0,36 \cdot (3,5 \cdot 2,78 - 1,3 \cdot 1,3) \cdot 35 + 0,36 \cdot (5 \cdot 2,78 - 1,3 \cdot 1,3) \cdot 35 + 2 \cdot 1,4 \cdot 1,3 \cdot 1,3 \cdot 35 + 0,93 \cdot 5 \cdot 3,5 \cdot (20 - 10) \\ \dot{Q}_o &= 583,52\text{W} \end{aligned}$$

3.2.5 Tepelná ztráta prostupem tepla

Tepelná ztráta místnosti prostupem tepla \dot{Q}_p , se určí ze vztahu

$$\dot{Q}_p = \dot{Q}_o \cdot (1 + p_1 + p_2 + p_3) \quad [\text{W}] \quad (3.2.3)$$

kde	\dot{Q}_o	-	základní tepelná ztráta prostupem tepla	[W]
	p_1	-	přirážka na vyrovnání vlivu chladných konstrukcí	[1]
	p_2	-	přirážka na urychlení zátoku	[1]
	p_3	-	přirážka na světovou stranu	[1]

Přirážka na vyrovnání vlivu chladných stavebních konstrukcí p_1 umožňuje zvýšení vnitřního vzduchu tak, aby i při nižší povrchové teplotě ochlazovaných

konstrukcí bylo ve vytápěné místnosti dosaženo požadované vnitřní teploty t_i . Tato přírážka závisí na průměrném součiniteli prostupu tepla skrze všechny konstrukce k_c , tento součinitel se stanoví ze vztahu:

$$k_c = \frac{\sum \dot{Q}_o}{\sum S \cdot (t_i - t_e)} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (3.2.4)$$

kde

- $\sum \dot{Q}_o$ - součet základních tepelných ztrát prostupem tepla skrz konstrukce [W]
 $\sum S$ - celková plocha všech konstrukcí ohraničující vytápěnou místnost [m²]
 t_i - výpočtová vnitřní teplota [°C]
 t_e - výpočtová teplota prostředí na vnější straně konstrukce [°C]

Přirážka na vyrovnání vlivu chladných stavebních konstrukcí p_1 se pak vypočte ze vztahu:

$$p_1 = 0,15 \cdot k_c \quad [1] \quad (3.2.5)$$

Při výpočtu přirážky na vyrovnání vlivu chladných stavebních konstrukcí p_1 pro místnost č. 1 postupuji následovně:

Dosazením do vztahu (3.2.4) dostávám hodnotu průměrného součinitele k_c :

$$k_c = \frac{101,30 + 82,81 + 153,85 + 82,81}{(8,04 + 1,69 + 12,21 + 1,69) \cdot [20 - (-15)]} = 0,509 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Následně dosazením do vztahu (3.2.5) získám hodnotu p_1 :

$$p_1 = 0,15 \cdot 0,509 = 0,076$$

S přirážkou na urychlení zátopy p_2 se počítá v tom případě, kdy ani při nejnižších venkovních teplotách nelze zajistit nepřerušovaný provoz vytápění. U budov se samostatnou kotelnou o jmenovitém výkonu do 150 kW se předpokládá, že ani při

nejnižších venkovních teplotách nelze zajistit nepřerušovaný provoz vytápění. Hodnotu přírážky na urychlení zátopy p_2 stanovují dle ČSN 06 0210:

$$p_2 = 0,1 \quad \text{při denní době vytápění delší nebo rovné než 16h.}$$

O výši přírážky na světovou stranu p_3 rozhoduje poloha nejvíce ochlazované konstrukce místnosti. Hodnoty přírážky p_3 jsou uvedeny v tabulce A.8 normy ČSN 06 0210.

V případě místnosti č.1 je nejvíce ochlazovaná jižní konstrukce s označením „SO” a proto hodnota přírážky na světovou stranu p_3 je:

$$p_3 = -0,05 \quad \text{pro jižní ochlazovanou konstrukci}$$

Nyní mohu dosadit do vztahu (3.2.3) a vypočítat tepelnou ztrátu prostupem tepla \dot{Q}_p konstrukcemi místnosti č. 1:

$$\dot{Q}_p = 583,52 \cdot (1 + 0,076 + 0,1 - 0,05) = 657,23 \text{ W}$$

3.2.6 Tepelná ztráta větráním

Tepelná ztráta větráním se stanoví ze vztahu:

$$\dot{Q}_v = c_v \cdot \dot{V}_v \cdot (t_i - t_e) \quad [\text{W}] \quad (3.2.6)$$

kde

c_v - objemová tepelná kapacita vzduchu při teplotě 0 °C, $c_v = 1300 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$

\dot{V}_v - objemový tok větracího vzduchu $[\text{m}^3/\text{s}]$

- za \dot{V}_v se dosazují hodnoty \dot{V}_{vH} nebo \dot{V}_{vP}

t_i - výpočtová vnitřní teplota $[\text{°C}]$

t_e - výpočtová teplota prostředí na vnější straně konstrukce $[\text{°C}]$

Objemový tok větracího vzduchu místnosti \dot{V}_v musí vycházet z hygienických nebo technologických požadavků, které jsou dány potřebnou intenzitou výměny vzduchu n_h . Nicméně v řešené budově se jedná ve všech místnostech, kromě koupelny (místnost č. 2), o přirozené větrání infiltrací. Objemový tok větracího vzduchu \dot{V}_{vp} se stanoví ze vztahu

$$\dot{V}_{vp} = \sum (i_{LV} \cdot L) \cdot B \cdot M \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (3.2.7)$$

kde

$\sum (i_{LV} \cdot L)$	- je součet průvzdušnosti oken a dveří místnosti	[$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-0,67}$]
i_{LV}	- součinitel spárové průvzdušnosti	[$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-0,67}$]
L	- délka spár otvíratelných částí oken a dveří	[m]
B	- charakteristické číslo budovy	[$\text{Pa}^{0,67}$]
M	- charakteristické číslo místnosti	[1]

Při výpočtu pro všechny místnosti volím následující hodnoty dle ČSN 06 0210:

$$B = 8 \text{ Pa}^{0,67} \quad \text{pro budovu v normální krajině, nechráněná a osaměle stojící}$$

$$M = 0,7$$

Rozměry a hodnoty součinitele spárové průvzdušnosti oken jsou dány výrobcem. Délky spár otvíratelných částí oken a dveří jsou znázorněny na obr. 7. Hodnota spárové průvzdušnosti pro použitá okna je následující:

$$i_{LV} = 5 \cdot 10^{-5} \quad \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-0,67}$$

Dosazením do vztahu (3.2.7) získám objemový tok větracího vzduchu \dot{V}_{vp} přirozeným větráním infiltrací pro místnost č.1:

$$\dot{V}_{vp} = 2 \cdot 5 \cdot 10^{-5} \cdot (3 \cdot 1,2 + 4 \cdot 0,6) \cdot 8 \cdot 0,7 = 3,36 \cdot 10^{-3} \quad \text{m}^3 / \text{s}$$

Hodnotu objemového toku větracího vzduchu dosazují do vztahu pro tepelnou ztrátu větráním (3.2.6) a dostanu tepelnou ztrátu větráním pro místnost č. 1:

$$\dot{Q}_v = 1300 \cdot 3,36 \cdot 10^{-3} \cdot [20 - (-15)] = 152,88 \text{ W}$$

Objemové toky větracího vzduchu pro ostatní místnosti kromě koupelny se budou počítat obdobně. U koupelny potřebné větrání je zajišťováno ventilátorem a volím potřebnou intenzitu výměny vzduchu $n_h = 0,3 \text{ h}^{-1}$.

Potřebný průtok \dot{V}_{vH} nuceným větráním se stanoví ze vztahu

$$\dot{V}_{vH} = \frac{n_h}{3600} \cdot V_m \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (3.2.8)$$

kde

V_m	-	je vnitřní objem místnosti	$[\text{m}^3]$
n_h	-	intenzita výměny vzduchu	$[\text{h}^{-1}]$

Dosazením do vztahu (3.2.8) získávám hodnotu objemového toku větracího vzduchu koupelny

$$\dot{V}_{vH} = \frac{0,3}{3600} \cdot 5 \cdot 3,5 \cdot 2,5 = 3,646 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Následuje obdobný postup jako u místnosti č. 1.

3.2.7 Celková tepelná ztráta budovy

Celková tepelná ztráta \dot{Q}_c se rovná součtu tepelné ztráty prostupem tepla konstrukcemi místnosti a tepelné ztráty větráním snižená o tepelné zisky.

$$\dot{Q}_c = \dot{Q}_p + \dot{Q}_v + \dot{Q}_z \quad [\text{W}] \quad (3.2.9)$$

Protože tepelné zisky u řešené budovy neuvažují, zjednoduší se předchozí vztah na

$$\dot{Q}_c = \dot{Q}_p + \dot{Q}_v \quad [\text{W}] \quad (3.2.10)$$

Dosažením do vztahu (3.2.10) dostávám celkovou tepelnou ztrátu pro místnost č.1

$$\dot{Q}_c = \dot{Q}_p + \dot{Q}_v = 657,23 + 152,88 = 810,11 \text{ W}$$

Tab. 5 Celkové tepelné ztráty jednotlivých místností

Číslo Místno sti	Tepelná ztráta prostupem tepla Q_p [W]	Tepelná ztráta větráním Q_v [W]	Celková tepelná ztráta Q_c [W]	Q_c po zaokrouhlení [W]
1	657,23	152,88	810,11	820,00
2	514,31	184,84	699,16	700,00
3	409,68	76,44	486,12	490,00
4	717,95	152,88	870,83	880,00
5	657,23	152,88	810,11	820,00
6	658,15	131,04	789,19	790,00
7	537,03	152,88	689,91	690,00
8	1580,78	180,91	1761,68	1770,00
9	1694,25	180,91	1875,16	1880,00
Celkem	7424,93	1365,66	8790,59	8840,00

4 Výpočet potřeby tepla na vytápění a ohřev TUV

4.1 Data otopného období

Údaje jsou zjištěny dle pramenu [16] a dle ČSN 06 0210:

Místo:	Opavsko
Nadmořská výška:	260 m
Počet dnů otopného období:	$d = 274$
Průměrná teplota topného období:	$t_{es} = 5,2 \text{ °C}$
Průměrná vnitřní výpočtová teplota:	$t_{is} = 19,9 \text{ °C}$
Výpočtová teplota venkovního prostředí:	$t_e = -15 \text{ °C}$
Výpočtová tepelná ztráta objektu:	$Q_C = 8,84 \text{ kW}$

4.2 Roční potřeba tepla na vytápění budovy [16]

Roční potřebu tepla počítám dle denostupňové metody a spočítá se ze vztahu:

$$\dot{Q}_{VYT,r} = \frac{e_i \cdot e_t \cdot e_d}{\eta_0 \cdot \eta_r} \cdot \frac{24 \cdot Q_c \cdot D}{(t_{is} - t_e)} \quad [\text{kWh/rok}] \quad (4.2.1)$$

kde

e_i	-	nesoučasnost tepelné ztráty infiltrací a tepelné ztráty prostupem	[1]
e_t	-	snížení teploty v místnosti během dne resp. noci	[1]
e_d	-	zkrácení doby vytápění u objektu s přestávkami v provozu	[1]
η_0	-	účinnost obsluhy resp. možnosti regulace soustavy	[1]
η_r	-	účinnost rozvodu vytápění	[1]
Q_c	-	celková tepelná ztráta objektu	[kW]
D	-	počet denostupňů	[K·den]
t_e	-	výpočtová teplota prostředí na vnější straně konstrukce	[°C]
t_{is}	-	průměrná vnitřní výpočtová teplota	[°C]

Počet denostupňů se určí ze vztahu:

$$D = (t_{is} - t_{es}) \cdot d \quad [\text{K·den}] \quad (4.2.2)$$

Dosažením dostanu:

$$D = (19,9 - 5,2) \cdot 274 = 4028 \text{ K} \cdot \text{den}$$

Volené konstanty:

e_i	=	0,85
e_t	=	0,90
e_d	=	1,00
η_0	=	0,95
η_r	=	0,95

Následným dosazením hodnot do vztahu (4.2.1) získávám

$$\dot{Q}_{VYT,r} = \frac{0,85 \cdot 0,9 \cdot 1}{0,95 \cdot 0,95} \cdot \frac{24 \cdot 8,84 \cdot 4028}{(19,9 + 15)} = 20756 \text{ kWh / rok}$$

4.3 Denní potřeba tepla na ohřev teplé užitkové vody

Denní předpokládaná potřeba tepla pro ohřev teplé užitkové vody (TUV) se vypočte dle vztahu

$$\dot{Q}_{TUV,d} = (1 + z) \cdot \rho \cdot c \cdot \dot{V}_{4p} \cdot (t_2 - t_1) \quad [\text{kJ/den}] \quad (4.3.1)$$

kde

z	-	koeficient energetických ztrát systému pro přípravu TUV	[1]
ρ	-	hustota vody	[kg / m ³]
c	-	tepelná kapacita vody	[kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
t_1	-	teplota studené vody	[°C]
t_2	-	teplota TUV	[°C]
\dot{V}_{4p}	-	celková potřeba teplé vody za 1 den	[m ³ /den]

Celková spotřeba teplé vody za jeden den je pak dán vztahem

$$\dot{V}_{4p} = n \cdot \dot{V}_{1p} \quad [\text{m}^3/\text{den}] \quad (4.3.2)$$

kde

n	-	počet osob v budově	[1]
\dot{V}_{1p}	-	potřeba teplé vody za 1 den na osobu	[m ³ /den]

Dané a volené hodnoty

$$\begin{aligned} z &= 0,1 \\ \rho &= 998,2 \text{ kg / m}^3 \\ c &= 4,186 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \\ t_1 &= 10 \text{ }^\circ\text{C}, t_2 = 60 \text{ }^\circ\text{C} \\ n &= 4, \dot{V}_{1p} = 60 \text{ l/den} = 0,060 \text{ m}^3/\text{den} \end{aligned}$$

Dosazením do (4.3.2) dostanu

$$\dot{V}_{4p} = 4 \cdot 0,06 = 0,24 \text{ m}^3/\text{den}$$

a následně dosazením hodnot do vztahu (4.3.1) získávám denní potřebu tepla pro ohřev teplé užitkové vody za jeden den:

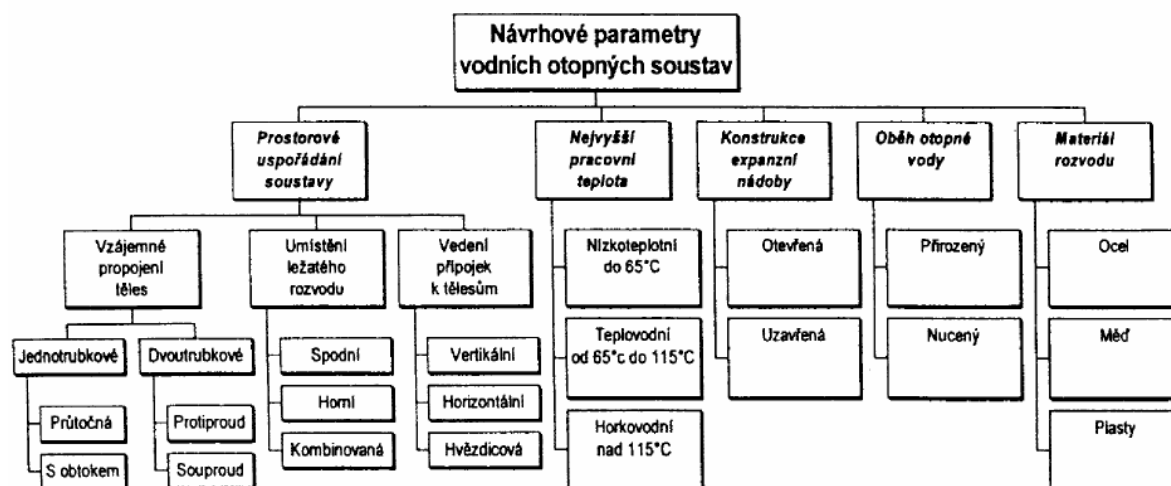
$$\dot{Q}_{\text{TUV,d}} = (1 + 0,1) \cdot 998,2 \cdot 4,186 \cdot 0,24 \cdot (60 - 10) = 55156 \text{ kJ/den} \approx 55 \text{ MJ/den} \approx 15,28 \text{ kWh/den}$$

5 Návrh otopné soustavy

Otopná soustava je část tepelné soustavy, která je určená k vytápění místnosti na požadovanou vnitřní teplotu. Skládá se ze zdrojů tepla, potrubní sítě, otopných těles, armatur a dalších prvků. Po potřeby vytápění daného rodinného domu volím vodní otopnou soustavu, která je založena na principu vzájemného propojení zdrojů tepla s otopnými tělesy uzavřeným vodním okruhem. Návrh zapojení zdrojů tepla je v **příloze č. 3** a rozmístění otopných těles v místnostech je uvedeno v **příloze č. 4 a 5**.

5.1 Volba návrhových parametrů otopné soustavy

Vodní otopnou soustavu je navrhována dle návrhových parametrů, které jsou uvedeny v diagramu na obr. 9.



Obr. 9 - Návrhové parametry vodních otopných soustav [6]

Kotelna je umístěna v podsklepení domu a odtud je vedena potřebná potrubní síť. Volím dvoutrubkové protiproudé propojení těles z důvodu vyšší provozní, hydraulické a tepelné stability oproti soustavám s jednotrubkovým zapojením. Konstrukce rodinného domu umožňuje realizaci otopné soustavy s dolním ležatým rozvodem, proto navrhuji umístění ležatého rozvodu do kanálu v podlaze. Na ležatý rozvod následně budou napojeny stoupací a přípojovací potrubí. Rozmístění otopných těles a vedení potrubí lze vidět na obr. 10. Mojí snahou při návrhu otopné soustavy bylo, aby levá i pravá větev soustavy s otopnými tělesy byla pokud možno co nejvíce symetricky vyvážená při daném uspořádání místností.



Obr. 10 - Návrh otopné soustavy v rodinném domě

Oběh v teplovodních soustavách je buď přirozený nebo nucený. Pro oběh vody v soustavě volím variantu teplovodního nuceného oběhu v uzavřené tlakové soustavě, kdy dopravní tlak je vyvolán činností oběhového čerpadla umístěného přímo do potrubí. Touto volbou získám lepší tepelné, hydraulické a regulační vlastnosti otopné soustavy a také bude dosaženo výraznějšího urychlení zátopu, než je tomu u přirozeného oběhu, vzniklého na základě rozdílných hustot přívodní a vratné vody. Jako materiál rozvodů volím měď, která má oproti potrubí z oceli hned několik výhod.

Jedna z výrazných výhod mědi je její odolnost vůči korozi, dále vnitřní povrch měděných trubek je hladší oproti trubkám z oceli a tudíž měděné potrubí vykazují menší tlakové ztráty. Měď má vysokou pevnost a proto je možné používat potrubí s malou tloušťkou stěn a tím související menší vnější průměr. Z estetických důvodů navrhuji, aby v co největším možném rozsahu bylo potrubí umístěno v kanálech ve zdech, v případě hlavního ležatého rozvodu v podlaze přízemí rodinného domu. Je však nutné zohlednit vysokou tepelnou roztažnost mědi při umístění potrubí, která je větší než u ocelových potrubí, ale na druhou stranu zase menší než u potrubí plastových. Z tohoto důvodů doporučuji měděné rozvody vody v kanálu izolovat a v místech, kde potrubí prochází zdí, umístit ochranné trubky většího průměru, které umožní tepelnou roztažnost měděné trubky.

5.2 Hlavní prvky otopné soustavy

Pro potřeby vytápění rodinného domu navrhuji následující hlavní prvky topného systému. Navrhuji, aby zdrojem tepla pro vytápění a ohřev TUV byl modul s palivovými články v kombinaci s plynovým kotlem, dalšími prvky budou akumulční nádrž, rozvody, oběhové čerpadla, expanzní nádrže, otopné tělesa a armatury. Celý systém pak bude doplněn o výpočetní jednotku, která vyhodnocuje signály z teplotních čidel a následně tato jednotka řídí patřičné regulační prvky dle aktuálních potřeb systému.

5.2.1 Volba typu palivového článku

Z kapitoly č. 2.7 plyne, že je možné zúžit výběr typu palivového článku pro využití v rodinném domě v podstatě na dva typy – palivové články s tuhými polymery - PEMFC nebo palivové články s tuhými oxidy – SOFC.

Palivový článek bude po celý rok dodávat elektrickou energii pro potřeby domu a jejich obyvatel. Odpadní teplo, které se vyprodukuje během činnosti palivových článků se prioritně využije na ohřev TUV a dále na topnou vodu určenou pro vytápění domu. Z hlediska kombinované výroby elektrické a tepelné energie jsou vysokoteplotní články SOFC, dle mého názoru, vhodnější typ. Tím, že v rodinném domě je

předpokládán trvalý pobyt osob a přibližně konstantní odběr elektrické energie bez výrazné nutnosti regulace elektrického výkonu s ohledem na možnost dodávat přebytečnou elektrickou energii do sítě, by se příliš nevyužila velká výhoda PEMFC článků, kterou je možnost rychlého náběhu na jmenovitý výkon a jejich pružná regulace. Dále SOFC články se mi jeví jako lepší typy zdroje tepla v kombinaci s plynovým kotlem nebo jiným zdrojem tepelné energie. Z těchto důvodů a také z důvodu lepší dostupnosti technických informací ze strany výrobců volím pro mé účely právě palivové články typu SOFC.

I přesto, že modul Galileo 1000 N od Hexis Ltd. nabízí z hlediska potřeb elektrické a tepelné energie rodinného domu kompletní řešení bez nutnosti zahrnutí dalších zdrojů tepla, není díky nízké elektrické účinnosti (25 až 30%) ideálním řešením. Z palivového článků musí být neustále plynule odváděno teplo. Tepelný výkon tohoto článku je poměrně vysoký (2,5 kW), toho by bylo možné využít v otopném období kromě ohřevu TUV také pro vytápění místností, nicméně mimo otopné období by se muselo velké množství přebytečného tepla využít jinak nebo vypouštět do vnějšího prostředí. Proto do otopné soustavy navrhuji začlenění systému s palivovými články BlueGenTM, který vykazuje vysokou elektrickou účinnost (až 60%) a s tím související větší výkon elektrický a menší tepelný výkon (max. 2 kW_e / 1 kW_t).

5.2.2 Volba plynového kotle [17]

Jako hlavní tepelný zdroj v otopném období na vytápění s ohledem na celkovou tepelnou ztrátu rodinného domu vypočtenou v kapitole 3.2.7 volím závěsný plynový kotel ZSN 5/11-6 KE CERAMINI firmy Junkers o maximálním výkonu 11 kW. Regulovatelný výkon je 5,5-10,9 kW. Regulace výkonu u tohoto kotle je plynulá.

5.2.3 Volba oběhových čerpadel [18]

Jako čerpadlo OČ1 (viz. příloha č. 3) volím VA 25/180 od firmy DAB. Na toto čerpadlo nejsou kladeny vysoké nároky co se týče regulace. Je určeno pro cirkulaci horké nebo studené vody v malých otopných soustavách a jeho parametry jsou následující:

Provozní rozsah: od 0,5 do 4 m³/h, dopravní výška do 6,3 m
Teplotní rozsah kapaliny: až 140 °C
Maximální konstrukční tlak: 10 bar (1000 kPa)

Na čerpadla (OČ2 a OČ3) jsou kladeny vyšší požadavky na regulační vlastnosti než na oběhové čerpadlo OČ1 v oběhu palivových článků. Pro oběh topné vody z plynového kotle a oběh do otopných těles proto volím čerpadla se zabudovanou řídicí jednotkou. Jedná se o mokroběžná čerpadla VEA 65/130 pro otopné oběhy s elektronickou regulací také od výrobce DAB. Řídicí jednotka vyhodnocuje změny v otopném systému a změnou otáček přizpůsobuje parametry čerpadla novým podmínkám. Při snížení otáček elektronickou regulací v době snížených nároků otopného systému, dochází k odlehčení čerpadla a tím i k nezanedbatelným úsporám elektrické energie. Parametry čerpadla VEA 65/130 jsou:

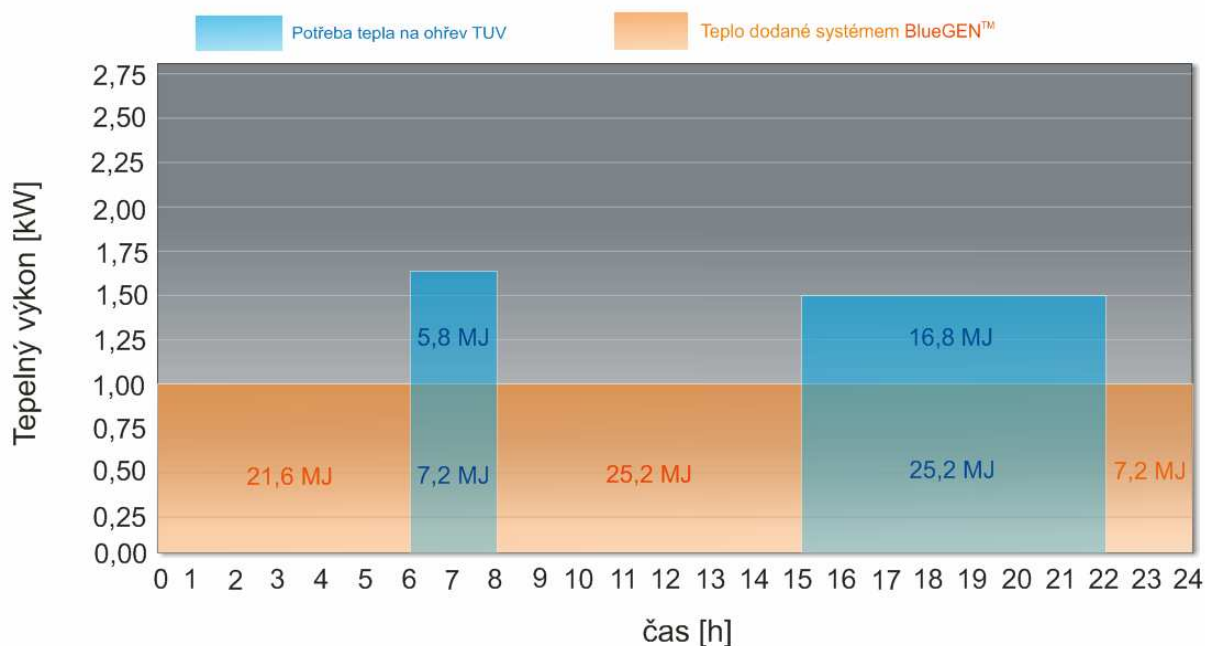
Provozní rozsah: od 0,5 do 3,5 m³/h s dopravní výškou do 5 m
Teplotní rozsah kapaliny: od 2°C do 95°C
Maximální konstrukční tlak: 10 bar (1000 kPa)

5.2.4 Návrh akumulární nádrže

Spotřeba tepla pro ohřev TUV není během dne konstantní a na základě výpočtu v kapitole 4.3 je její hodnota rozdělena do dvou časových úseků dne. V prvním dvouhodinovém úseku (od 6:00 do 8:00) je předpokládán odběr tepla 6,5 MJ za hodinu a zbytek tepla je rozložen v sedmihodinovém úseku (od 15:00 do 22:00), kdy je odběr 6 MJ za hodinu, viz. obr. 11. Tepelný výkon palivového článku je 1 kW a dodává do systému časově konstantní množství energie. Výkon 1 kW znamená, že během jedné hodiny palivové články dodají do systému 3,6 MJ a během jednoho dne 86,4 MJ tepelné energie. Tato hodnota tepelné energie za jeden den je větší než potřeba tepla na ohřev TUV v jednom dni (přebytek tepelné energie je 31,4 MJ/den) a mohu tedy konstatovat, že palivové články jsou schopné pokrýt potřebu tepla na ohřev TUV a navíc přebytečné teplo lze dále využít.

Z obr. 11 plyne nutnost zařazení akumulace tepla do otopné soustavy, aby byla vyrovnána nerovnoměrnost v dodávce tepla s odběrem tepla během dne. Navrhuji, aby úlohu akumulace tepla zajistil akumulární zásobník se vnořeným zásobníkem TUV.

Jednou z výhod tohoto zásobníku je, že je zajištěn ohřev TUV a akumulaci tepla v topné vodě v jednom zásobníku a tím je ušetřen prostor. Volím akumulční nádrž DUO-E firmy Regulus, která je určena pro ohřev a akumulaci tepla pro vytápění v domácích aplikacích v uzavřených tlakových okruzích s nuceným oběhem. Na akumulční nádrž je možné napojit několik zdrojů tepla. V nádrži je umístěn zásobník na TUV, která je ohřívána od topné vody v akumulční nádrži.



Obr. 9 - Potřeba tepla na ohřev TUV a dodané teplo palivovými články během dne

Regulus vyrábí následující typy akumulčních nádrží DUO-E 600/150, DUO-E 750/200, DUO-E 1000/220 a DUO-E 1500/300 [19]. Označení typu znamená, že například typ DUE-E 600/150 má celkový objem 600 l a objem vnořeného zásobníku je 150 l. Výrobce doporučuje, aby maximální teplota v akumulční nádrži byla 90 °C. Ohřátí vody v akumulční nádrži na 60 °C je zajištěno plynovým kotlem, což je v podstatě jakási startovací fáze, kterou při předpokládaném odběru tepelné energie není třeba opakovat. V další fázi je voda v nádrži ohřívána z 60 °C na 90 °C pomocí palivových článků. K dispozici je za jeden den zmíněných 86,4 MJ tepelné energie z činnosti palivových článků. Při výpočtu objemu nádrže vycházím z předpokladu, že je potřeba akumulční nádrž dimenzovat tak, aby zajistil naakumulování alespoň

minimálně tohoto množství tepelné energie za jeden den. Předběžný celkový objem akumulární nádrže pak počítám ze vztahu:

$$V_{AN}' = \frac{Q_{PAL,d}}{\rho \cdot c \cdot \Delta t} \cdot 1000 \quad [l] \quad (5.2.1)$$

kde

$Q_{PAL,d}$	- množství tepla dodané palivovými články za 1 den	[kJ]
c	- tepelná kapacita vody	[kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
ρ	- hustota vody	[kg / m ³]
Δt	- rozdíl teplot, $\Delta t = 363,15 - 333,15 = 30 \text{ K}$	

Dané hodnoty

$$Q_{PAL,d} = 86,4 \text{ MJ} = 86400 \text{ kJ}$$

$$\rho = 998,2 \text{ kg/m}^3$$

$$c = 4,186 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

Dosazením hodnot do vztahu (5.2.1) dostávám předběžný celkový objem akumulární nádrže:

$$V_{AN}' = \frac{86400}{998,2 \cdot 4,186 \cdot 30} \cdot 1000 = 689,25 \text{ l}$$

Volím nejbližší vyšší objem vyráběné akumulární nádrže. Jedná se o typ **DUO-E 750/200**. Celkový objem nádrže je tedy $V_{AN} = 750 \text{ l}$ a objem vnořeného zásobníku je 200 l.

Čas, za který dokáže modul s palivovými články ohřát vodu o objemu V_{AN} z teploty 60 °C na 90 °C v akumulární nádrži, je dán vztahem:

$$\tau = \frac{V_{AN}}{3,6 \cdot 10^6 \cdot \dot{Q}_{PAL}} \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta t \quad [h] \quad (5.2.2)$$

kde \dot{Q}_{PAL} - tepelný výkon palivového článku, $\dot{Q}_{PAL} = 1 \text{ kW}$

$$\tau = \frac{750}{3,6 \cdot 10^6 \cdot 1} \cdot 998,2 \cdot 4,186 \cdot 30 = 26,11 \text{ h}$$

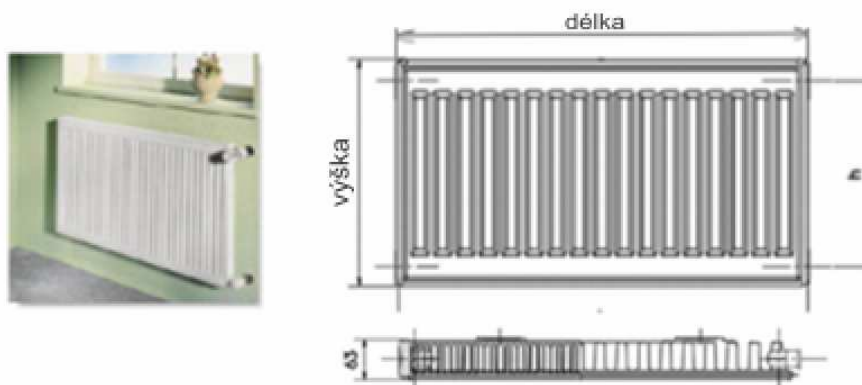
Vypočtená hodnota říká, že akumulční nádrž je schopna akumulovat tepelnou energii dodávanou po dobu 26,11 hodin palivovými články v daném rozsahu teplot a to bez zohlednění odběru tepla v TUV. S ohledem na odběr tepla v TUV se čas, po který mohou palivové články dodávat teplo do akumulční nádrže, ještě prodlouží.

5.2.5 Návrh otopných těles

Otopná tělesa slouží k dodávání tepla do vytápěné místnosti tak, aby došlo k pokrytí tepelných ztrát místnosti a vytvoření patřičné tepelné pohody pro obyvatele domu. Při rozhodování, který typ otopných těles zvolím, mám možnost výběru ze čtyř druhů:

- článková otopná tělesa
- desková otopná tělesa
- trubková otopná tělesa
- konvektory

Pro vytápění domu volím desková otopná tělesa, které jsou v dnešní době nejpoužívanější. Jedná se o tělesa společnosti KORADO, a.s., model RADIK KLASIC typ 11, což je otopné těleso vyrobené ze 1,5 mm silného ocelového plechu, které umožňuje levé nebo pravé připojení otopné vody a je určeno pro přirozené i nucené oběhy (obr. 12).



Obr. 10 - Otopné těleso RADIK KLASIC typu 11 použité pro vytápění místností [20]

Při rozměrovém návrhu deskových otopných těles vycházím z klasického návrhu, kde je jedinou podmínkou pokrytí tepelné ztráty místnosti. Z katalogu výrobce vybírám těleso s příslušným rozměrovým řešením a s příslušným tepelným výkonem. Při návrhu rozměrů otopného tělesa je snaha, pokud možno, volit délku tělesa v délce oken, aby došlo k zabránění proudění chladných padajících proudů až k podlaze a tím vytvoření lokální tepelné nepohody v místnosti. Tab. 6 zobrazuje v přehledu zvolené rozměry deskových otopných těles pro jednotlivé místnosti.

Při rozměrovém návrhu otopných těles vycházím z tepelné ztráty místnosti, vnitřní výpočtové teploty a teplot topné a vratné vody v okruhu, které volím:

Teplota topné vody	$t_t = 75 \text{ }^\circ\text{C}$
Teplota vratné vody	$t_v = 65 \text{ }^\circ\text{C}$

Tab. 6 Přehled rozměrů deskových otopných těles pro jednotlivé místnosti

Číslo Místnosti	Vnitřní výpočtová teplota [°C]	Tepelná ztráta místnosti [W]	Tepelný výkon otopného tělesa [W]	Rozměry tělesa délka x výška [mm]	Počet kusů [1]
1	20	820,00	991	1400 x 400	1
2	24	700,00	887	1400 x 400	1
3	20	490,00	769	1400 x 300	1
4	20	880,00	991	1400 x 400	1
5	20	820,00	991	1400 x 400	1
6	15	790,00	2 x 871	1400 x 300	2
7	20	690,00	991	1400 x 400	1
8	20	1770,00	2 x 1274	1800 x 400	2
9	20	1880,00	2 x 1274	1800 x 400	2

5.3 Popis funkce otopné soustavy

K práci je přiloženo schéma zapojení jednotlivých prvků otopné soustavy se začleněním palivových článků jako **příloha č. 3**.

5.3.1 Provoz otopné soustavy mimo otopné období

V době, kdy není potřeba vytápět místnosti, ale je pouze nutné zajistit ohřev TUV, dodává modul s palivovými články (MPC) do akumulární nádrže (AN) tepelnou energii a ohřívá topnou vodu v nádrži přes topného hada. Vycházím z předpokladu, že maximální teplota v akumulární nádrži bude nastavena na 90 °C. Teplotní čidlo č. 1 (TČ1) umístěné v akumulární nádrži hlídá tuto teplotu, kterou následně vyhodnocuje centrální regulátor (CR). Jestliže je teplota vyšší než 90 °C, centrální regulátor vysílá signál pro pohon trojcestného ventilu (TV1). Tímto jde přebytečné teplo okruhem do výměníku přebytečného tepla (VPT) a z výměníku je vypouštěno teplo do venkovního prostředí nebo je zde možnost jeho dalšího využití (vyhřívání bazénu apod.). Do akumulární nádrže se pak přivádí jen tolik tepla, aby byla teplota topné vody udržována na hodnotě do 90 °C. Je nutné do výstupního potrubí ze vnořeného zásobníku TUV nainstalovat trojcestný směšovací ventil s termostatickým pohonem (TV2) zajišťující potřebnou výstupní teplotu TUV směšováním se studenou vodou (SV) z přívodu. Oběhové čerpadlo 1 (OČ1), které zajišťuje oběh topné vody, pracuje neustále dle provozu palivových článků. Činnost OČ1 je hlídána regulátorem palivových článků (PR). Do uzavřeného oběhu palivové články - akumulární nádrž je zařazena membránová expanzní nádrž (EX1) včetně pojistného ventilu (PV1), stejně tak je i akumulární nádrž vybavena expanzní nádrží (EX2) s pojistným ventilem (PV2).

V případě neočekávaného odběru tepla ze zásobníku odběrem TUV a poklesu teploty v akumulární nádrži pod 50 °C je plynový kotel (K) uveden do provozu. Je řízen centrálním a kotlovým regulátorem (KR) a dodává potřebné teplo do té doby, dokud teplota topné vody v akumulární nádrži nedosáhne 60 °C. Rychlou odezvu zajistí kombinace snímání teploty vody čidly TČ1 a TČ2 v akumulární nádrži a ve vnořeném zásobníku a díky následnému vyhodnocení centrálním regulátorem. V případě dosažení teploty vody 60 °C plynový kotel vypne a dohřátí topné vody v akumulární nádrži zajistí palivové články. Trojcestné ventily TV2 a TV3 jsou během tohoto ohřevu topné vody kotlem pro okruh do otopných těles (OT) pohonem uzavřeny. Chod oběhového čerpadla číslo OČ2 je řízen centrálním regulátorem dle informací z kotlového regulátoru.

5.3.2 Provoz otopné soustavy v otopném období

V první fázi během otopného období je hlavním zdrojem tepla pro vytápění plynový kotel, který dodává v této fázi teplo samostatně a nezávisle na činnosti palivových článků. Množství tepla dodaného do přívodního potrubí plynovým kotlem je regulováno podle aktuálních potřeb vyhodnocených centrálním regulátorem a pomocí dálkového ovládání s čidlem teploty venkovního vzduchu (TČ3). Potřeba tepla na ohřev topné vody ve vytápěných prostorech je závislá na venkovní teplotě a teplotní čidlo, které je umístěno na venkovní straně domu, předává informaci o teplotě do centrálního regulátoru, který následně dle otopné křivky určenou v souladu s charakteristikou otopné soustavy a objektu nastavuje výkon kotle tak, aby byla dosažena potřebná teplota topné vody v přívodním potrubí (snímá teplotní čidlo TČ4). Je však ještě nutné otopné tělesa ve vytápěných místnostech vybavit termostatickými regulačními ventily (TRV), které zajistí nastavení určené teploty v jednotlivých místnostech. V této fázi je okruh z kotle uzavřen ventily TV3 a TV4 pro okruh do akumulární nádrže a teplá voda je vedena přímo do topných těles. Pohyb teplé vody zajišťuje spolupráce dvou čerpadel OČ1 a OČ2 zapojených v sérii a řízených centrálním regulátorem. Mezitím díky činnosti modulu s palivovými články se akumuluje teplo v AN.

V případě, že teplota v akumulární nádrži dosáhne hodnoty 90 °C a zároveň teplota TUV ve vnořeném zásobníku je více jak 60 °C, je tedy splněna podmínka přípravy TUV, centrální regulátor vyhodnotí tuto situaci a začne se využívat tepelná energie naakumulovaná v AN pro účely vytápění. Plynový kotel vypne, přepnou se ventily TV3 a TV4 pro oběh z akumulární nádrže. Teplá voda z akumulární nádrže jde do otopných těles díky oběhového čerpadla OČ3. V této fázi je čerpadlo OČ2 nečinné.

V situaci, kdy teplota topné vody v akumulární nádrži klesne na hodnotu 60°C je okruh z akumulární nádrže do otopných těles uzavřen a následuje opětovné „nabíjení“ akumulární nádrže na teplotu topné vody 90°C. Dodávku tepla na vytápění v tomto případě zajišťuje opět pouze plynový kotel.

6 Závěr

V teoretické části bakalářské práce jsem popsal základní princip palivových článků a jejich možnost aplikace jako zdroj elektrické a tepelné energie pro rodinné domy. Ve světě je jen několik málo výrobců, kteří vyrábějí systémy s palivovými články jako kogenerační jednotky. Mnohdy jsou palivové články v našem podvědomí vnímány jako budoucí šetrný zdroj elektrické a tepelné energie k životnímu prostředí. Nyní po nastudování problematiky palivových článků, mohu říci, že tato technologie se může stát rozšířeným zdrojem energie, ovšem za předpokladu, že se výrazně sníží náklady na její výrobu, která v dnešní době vyžaduje částky v řádech statisíců až milionů korun, a také prodlouží životnost jednotlivých dílů. Nicméně díky své vysoké účinnosti a s tím spojené snížení spotřeby paliva a tomu odpovídající snížení provozních nákladů má výroba elektrické energie palivovými články jasnou převahu před stávajícími konvenčními způsoby výroby elektrické energie.

V další části práce se věnuji výpočtu tepelných ztrát existujícího rodinného domu. Protože dům je řádně zateplen a vybaven novými okny je celková tepelná ztráta domu přijatelných 8,84 kW. S ohledem na tuto hodnotu jsem následně provedl výpočet roční tepelné potřeby rodinného domu dle denostupňové metody a ta činí 20756 kWh/rok. Denní potřeba tepla na ohřev teplé užitkové vody pro čtyři osoby je 15,28 kWh/den.

Palivový článek jsem zvolil typu SOFC společnosti Ceramic Fuel Cell Limited, tedy vysokoteplotní článek s elektrickým výkonem 2 kW a tepelným výkonem 1kW. Dále jsem navrhl otopnou soustavu. Tento návrh obsahuje volbu základních prvků otopné soustavy, včetně návrhu otopných těles, zapojení jednotlivých zdrojů energie do otopné soustavy doplněný o popis funkce v otopném a mimo otopné období. Mojí snahou při návrhu začlenění palivového článku bylo, aby systém s palivovými články, kromě dodávání elektrické energie, prioritně ohříval TUV v zásobníku a přebytečné teplo bylo využíváno pro účely vytápění v otopném období v kombinaci s teplem dodaným zvoleným plynovým kotlem. Jako prvek pro akumulaci přebytečného tepla jsem zvolil akumulární nádrž se vnořeným zásobníkem TUV o celkovém objemu 750 l.

7 Seznam použitých pramenů

- [1] LARMINIE, J., DICKS, A. *Fuel Cell Systems Explained*. 2nd edition. Chichester : John Wiley and Sons Inc., 2003. 418 s. ISBN 0-470-84857-X.
- [2] SZELIGA, Z. *Základy technologie palivových článků*. 2008. vyd. Ostrava : VŠB-TUO, 2008. 98 s. ISBN 978-80-248-1671-5.
- [3] KADLEC, Z. *Termomechanika : Návod do cvičení*. Ostrava : VŠB - TU Ostrava, 2001. 97 s. ISBN 80-7078-912-3.
- [4] ČSN 06 0210. Výpočet tepelných ztrát budov při ústředním vytápění. 1994
- [5] ČSN 73 0540-3. Tepelná ochrana budov - Část 3: Návrhové hodnoty veličin. 2005
- [6] PETRÁŠ, D, et al. *Vytápění rodinných a bytových domů*. Bratislava : Jaga group, 2005. 246 s. ISBN 80-8076-020-9.
- [7] PORŠ, Z. *Palivové články*. 2002. 78 s. Dostupný z WWW:
<http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/palivove-clanky.pdf>
- [8] CFCL. *History of Fuel Cells* [online]. 2009 [cit. 2009-05-02]. Dostupný z WWW:
<http://www.fuelcellmarkets.com/ceramic_fuel_cells/news_and_information/3,1,443,1,7900.html>.
- [9] Fuel Cells. *Ludwig Mond and Charles Langer* [online]. 2007 [cit. 2009-04-03]. Dostupný z WWW: <<http://aboutfuelcells.wordpress.com/2007/06/04/ludwig-mond-and-charles-langer/>>
- [10] Ballard Power Systems Inc.. *FCgen – 1030V3* [online]. 2009 [cit. 2009-04-09]. Dostupný z WWW: <http://www.ballard.com/files/pdf/Case_Studies/Cogen_Value_Prop_docmetrics.pdf>.
- [11] HEXIS Ltd.. *Galileo : decentralised energy and heat supply with fuel cells* [online]. 2007 [cit. 2009-04-07]. Dostupný z WWW:
<http://www.hexis.com/downloads/hexis_prospekt_englisch_web0703.pdf>.

[12] Ceramic Fuel Cells Limited. *BlueGEN : Modular Generator - Power + Heat* [online]. 2009 [cit. 2009-04-30]. Dostupný z WWW: <[http://www.cfcl.com.au/Assets/Files/BlueGen_Brochure\(ENG_GER\)_Mar-09.pdf](http://www.cfcl.com.au/Assets/Files/BlueGen_Brochure(ENG_GER)_Mar-09.pdf)>.

[13] FATRA, a.s.. *Termofix : vinylová heterogenní podlahová krytina* [online]. 2008 [cit. 2008-12-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.fatra.cz/index.php?typ=FAA&showid=418>>.

[14] LASSELSBERGER, s.r.o.. *Bytová keramika : Podlahová dlažba keramická Rako* [online]. 2008 [cit. 2008-01-01]. Dostupný z WWW: <http://www.rako.cz/cz/inspirace/bytova_keramika>.

[15] VEKRA okna. *Technické parametry oken a dveří* [online]. 2008 [cit. 2008-02-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.vekra.cz/284-technicke-parametry.html>>.

[16] REINBERK, Z. *Potřeba tepla pro vytápění* [online]. 2003 [cit. 2009-04-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.tzb-info.cz/t.py?t=16&i=47&h=38&obor=5>>.

[17] Bosch Termotechnika s.r.o.. *ZSN 5/11-6 KE CERAMINI* [online]. 2009 [cit. 2009-05-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.junkers.cz/vyrobky/zavesne-kotle/cerastar-a-ceramini/zsn-5-11-6-ceramini/>>.

[18] IVAR CS. *Mokroběžná oběhová čerpadla* [online]. 2009 [cit. 2009-05-08]. Dostupný z WWW: <<http://www.ivarcs.cz/cz/mokrobezna-obehova-cerpadla-va>>.

[19] REGULUS s.r.o.. *Akumulační nádrž DUO-E s vnořeným zásobníkem TV* [online]. 2008 [cit. 2009-04-30]. Dostupný z WWW: <<http://www.regulus.cz/pdf/Akumulacni%20nadrze%20DUO-E%20-%20A4%20-%20CZ.pdf>>.

[20] KORADO, a.s.. *RADIK KLASIK : deskové otopné těleso* [online]. 2009 [cit. 2009-05-01]. Dostupný z WWW: <http://www.korado.cz/cs/vyrobky/radik/prehled_modelu/radik_klasik/index.shtml>.

8 Přílohy

Příloha č. 1 Rozdělení palivových článků včetně jejich základních parametrů [2]

Příloha č. 2 Tabulky výpočtů tepelných ztrát objektu v jednotlivých místnostech
(počet: 9 stran)

Příloha č. 3 Schéma zapojení modulu s palivovými články do otopné soustavy

Příloha č. 4 Otopná soustava – přízemí

Příloha č. 5 Otopná soustava – 1. patro

Příloha č. 6 CD-ROM obsahující:

- text bakalářské práce (Bakalářská práce.doc, Bakalářská práce.pdf),
- rozdělení palivových článků (rozdělení palivových článků.pdf)
- tabulky výpočtů tepelných ztrát místností (tepelné ztráty.xls, Microsoft Excel 2003),
- výkresy otopné soustavy (AutoCad 2002)