

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky
Obor: Aplikovaná elektrotechnika



**Energeticky soběstačný dům s
využitím vodíkových technologií**
**Energy self-sufficient house with
the usage of hydrogen technologies**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Pavel Havelka
Vedoucí práce: Ing. Jan Votava
Rok: 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Havelka** Jméno: **Pavel** Osobní číslo: **499088**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Energeticky soběstačný dům s využitím vodíkových technologií

Název bakalářské práce anglicky:

Energy self-sufficient house using hydrogen technology

Pokyny pro vypracování:

- 1) Technologie zpracování vodíku.
- 2) Identifikace objektu.
- 3) Návrh zásobování rodinného domu energií.
- 4) Technicko – ekonomické zhodnocení proveditelnosti.

Seznam doporučené literatury:

- 1) 1. KAMEŠ, Josef. Vodík alternativní palivo. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-254-1686-0.
- 2) KLEBANOFF, Lennie. Hydrogen Storage Technology. Milton Park, Abingdon-on-Thames, Oxfordshire United Kingdom: Taylor & Francis, 2016. ISBN 9781138199293.
- 3) CALISE, Francesco. Solar Hydrogen Production. Cambridge, Massachusetts, USA: Academic Press, 2019. ISBN 9780128148549.
- 4) GANDIA, Luis M., Gurutze ARZAMENDI a Pedro M. DIEGUEZ. Renewable Hydrogen Technologies : Production, Purification, Storage, Applications and Safety. Polsko: Elsevier, 2013. ISBN 9780444563521.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Votava katedra elektroenergetiky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **20.02.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **16.02.2025**

Ing. Jan Votava
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Zdeněk Müller, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....
Pavel Havelka

Poděkování

Děkuji Ing. Janu Votavovi, za vedení mé bakalářské práce a jeho podnětné návrhy, kterými ji obohatil a doplnil mé znalosti v oboru. Chtěl bych také poděkovat svým rodinným příslušníkům za celkovou podporu při studiu. Zároveň chci poděkovat své přítelkyni Alžbětě Koubkové za kontinuální podporu v průběhu kompletace této bakalářské práce a jejímu otci Petru Koubkovi za podnětné připomínky, které rovněž vedly k zlepšení mé práce.

Pavel Havelka

Abstrakt: Tato bakalářská práce se zabývá konverzí starého domu na energeticky soběstačný dům s využitím vodíkových technologií. Nejprve teoreticky analyzuje dílčí komponenty zpracování vodíku tedy komponenty výroby, uskladnění a transformace na tepelnou a elektrickou energii. Hlavní část práce je tvořena odhadem energetické náročnosti celého projektu v otopném a neotopném období. Dále se věnuje teoretickému návržení technického vybavení budovy, popisu logiky využití jednotlivých komponent a odhadu jejich instalovaného výkonu. Odhad výkonu fotovoltaické elektrárny byl zprostředkován pomocí internetových nástrojů, jako je např. PVGIS. Analýzou získaných dat byl odhadnut pravděpodobný přísun solární energie, díky čemuž bylo možno odhadnout chování celého systému.

Závěrem se práce zabývá technicko-ekonomickým zhodnocením proveditelnosti, kde přibližuje zda-li má takto koncipovaný systém smysl. Pro technické zhodnocení byla zohledněna normace montáže a provozu, opravitelnost a dostupnost využitých komponent. Pro ekonomické zhodnocení byly použity některé parametry ekonomické analýzy.

Klíčová slova: vodík, PEM elektrolyzér, PEM palivový článek, fotovoltaická elektrárna

Abstract: This bachelor's thesis deals with converting an old house into an energy-self-sufficient house using hydrogen technologies. In the beginning, it theoretically deals with all sub-components of hydrogen processing - production, storage, and conversion to electrical energy. The main part of this work is the estimation of the consumption of the designed household for the heating and non-heating periods, i.e. the energy demand of the entire project. It also deals with the theoretical design of the technical equipment of the building, the description of the logic of the use of individual components, and the estimation of their installed performance. To estimate the performance of the FVE - photovoltaic power plant, freely available internet calculators such as PVGIS were used. By analyzing the data measured the likely solar energy input was estimated, which made it possible to estimate the way the rest of the components would operate.

In the end, the work deals with the technical-economic evaluation of the feasibility, where it approximates whether the system conceived in this way makes sense. For the technical evaluation, the standardization of assembly and operation, repairability, and availability of used components were taken into account. Some parameters of the economic analysis were used for the economic evaluation.

Key words: hydrogen, PEM electrolyzer, PEM fuel cell, photovoltaic power plant

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Seznam použitých zkratk | ix |
| Seznam obrázků | x |
| Úvod | 1 |
| 1 Technologie zpracování vodíku | 3 |
| 1.1 Vodíkový okruh | 3 |
| 1.2 Úprava vody | 4 |
| 1.3 Elektrolyzér | 4 |
| 1.3.1 Termodynamika elektrolýzy vody | 4 |
| 1.3.2 Elektrolýza PEM | 5 |
| 1.3.3 Účinnost PEM elektrolýzy | 6 |
| 1.4 Uskladnění vodíku | 6 |
| 1.4.1 Unikání vodíku | 7 |
| 1.5 Palivový článek | 7 |
| 1.5.1 PEM palivový článek | 7 |
| 1.5.2 Termodynamický popis článku | 8 |
| 1.5.3 Účinnost PEM palivového článku | 9 |
| 1.5.4 Tepelná emisivita reakce | 9 |
| 1.5.5 Využitelný proud a napětí článku | 9 |
| 1.6 Možnosti systému | 10 |
| 1.6.1 Výpočet účinnosti systému | 11 |
| 2 Energetická bilance projektu | 13 |
| 2.1 Identifikace objektu | 13 |
| 2.1.1 Dostupné prostory pro techniku | 14 |
| 2.2 Odhad spotřeby | 14 |
| 2.2.1 Elektrické spotřebiče | 14 |
| 2.2.2 Provoz elektrolyzéro | 15 |
| 2.3 Odhad denního odběrového diagramu | 15 |
| 2.3.1 Neotopné období | 18 |
| 2.3.2 Otopné období | 19 |
| 2.4 Tepelné požadavky | 20 |
| 3 Návrh zásobování rodinného domu energií | 23 |
| 3.1 Logika využití komponent | 23 |
| 3.2 Odhad instalovaného výkonu | 24 |
| 3.2.1 Fotovoltaická elektrárna | 24 |
| 3.2.2 Palivový článek | 25 |
| 3.2.3 Možnosti komponent | 25 |
| 3.3 Vytápění | 26 |
| 3.3.1 Výpočet tepelné emisivity palivového článku | 26 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.3.2 | Doplňkové komponenty pro vytápění | 26 |
| 4 | Technicko-Ekonomické zhodnocení proveditelnosti | 29 |
| 4.1 | Technické zhodnocení proveditelnosti | 29 |
| 4.1.1 | Dostupnost využitých technologií | 30 |
| 4.1.2 | Obtížnost oprav | 30 |
| 4.2 | Ekonomické zhodnocení | 31 |
| 4.2.1 | Úvodní investice | 31 |
| 4.2.2 | Doba návratnosti | 31 |
| 4.2.3 | Vnitřní výnosové procento | 32 |
| 4.3 | Celkové zhodnocení | 33 |
| | Závěr | 35 |
| | Bibliografie | 37 |
| | Přílohy | 41 |
| A | Odběrový diagram bytu ze dne 15.3.2023 | 41 |
| B | Odběrový diagram bytu ze dne 20.5.2023 | 42 |
| C | Odběrový diagram bytu ze dne 21.5.2023 | 43 |
| D | Odběrový diagram bytu ze dne 22.5.2023 | 44 |

Seznam použitých zkratek

| | |
|--------------|---|
| FVE | Fotovoltaická elektrárna (<i>Photovoltaic powerplant</i>) |
| PEM | Proton vodivá membrána (<i>Proton-exchange membrane</i>) |
| MEA | Sestava s membránovou elektrodou (<i>Membrane electrode assembly</i>) |
| FVP | Fotovoltaický panel (<i>Photovoltaic cell</i>) |
| FC | Palivový článek (<i>Fuel cell</i>) |
| PEMFC | PEM palivový článek (<i>PEM fuel cell</i>) |
| OZE | Obnovitelný zdroj energie (<i>Renewable energy source</i>) |
| IRR | Vnitřní výnosové procento (<i>internal rate of return</i>) |
| WACC | Průměrné náklady kapitálu (<i>Weighted average cost of capital</i>) |
| SPE | Pevná polymerní elektrolytická membrána (<i>solid-polymer electrolyte membrane</i>) |
| EDF | Fond ochrany životního prostředí (<i>Environmental defense fund</i>) |

Seznam obrázků

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Diagram vodíkového okruhu | 3 |
| 1.2 | PEM elektrolyzér | 5 |
| 1.3 | PEM palivový článek | 8 |
| 2.1 | Letecký snímek objektu[16] | 13 |
| 2.2 | Přibližné odběrové diagramy v neotopném období | 18 |
| 2.3 | Přibližné odběrové diagramy v otopném období | 19 |
| 2.4 | Jednotlivé tepelné ztráty domu[22] | 20 |
| 3.1 | Zapojení komponent na výrobu elektrické a tepelné energie | 23 |
| 3.2 | Rozptyl výkonů dle denní doby v měsíci z roku 2015-2020 | 24 |
| 3.3 | Princip fungování pískové baterie | 27 |

Úvod

Vodíkové technologie jsou v dnešní době široce rozebíraným tématem. Přechod z fosilních paliv na paliva udržitelná v sektoru průmyslovém, automobilovém či sektoru veřejném je jedním z nejdůležitějších aspektů dnešní doby. Klade se důraz na energetickou soběstačnost a ekologický provoz domácností, neboť velká část domácností evropských i světových se snaží alespoň o částečně energeticky soběstačný provoz. Fúzí těchto dvou odvětví se dostáváme ke konceptu energeticky soběstačné budovy, jejíž emisní stopa je prakticky pouze ta, která je způsobena výrobou jednotlivých komponent systému.

Z ekologického hlediska je vodík jeden z nejvýznamnějších druhů paliv. Při výrobě totiž prakticky potřebujeme pouze vodu, která je rovněž odpadním produktem při zpětném získávání energie. Využitím všude dostupné solární energie jsme schopni energeticky zásobovat proces výroby a uskladnění vodíku. Následně zpětně použít uskladněnou energii, v podobě vodíku, v dobách energetického deficitu. Díky tomu jsme schopni dosáhnout 100 % energetické soběstačnosti domácnosti - ostrovního provozu.

Tato bakalářská práce se bude zabývat konverzí starého domu na dům soběstačný s využitím vodíkových technologií. Práce je rozdělena do čtyř segmentů. V prvním bude teoreticky analyzovat jednotlivé technologie zpracování vodíku. V druhém bude pojednávat o energetické bilanci budovy, v níž budou zohledněny její jednotlivé parametry - elektrická spotřeba, tepelná náročnost atp. Třetí segment se bude zabývat samotným návrhem celého kogeneračního systému. Ve čtvrtém segmentu bude celkové technicko-ekonomické zhodnocení, v němž bude zohledněno, zda-li navržený systém dává z obou hledisek smysl.

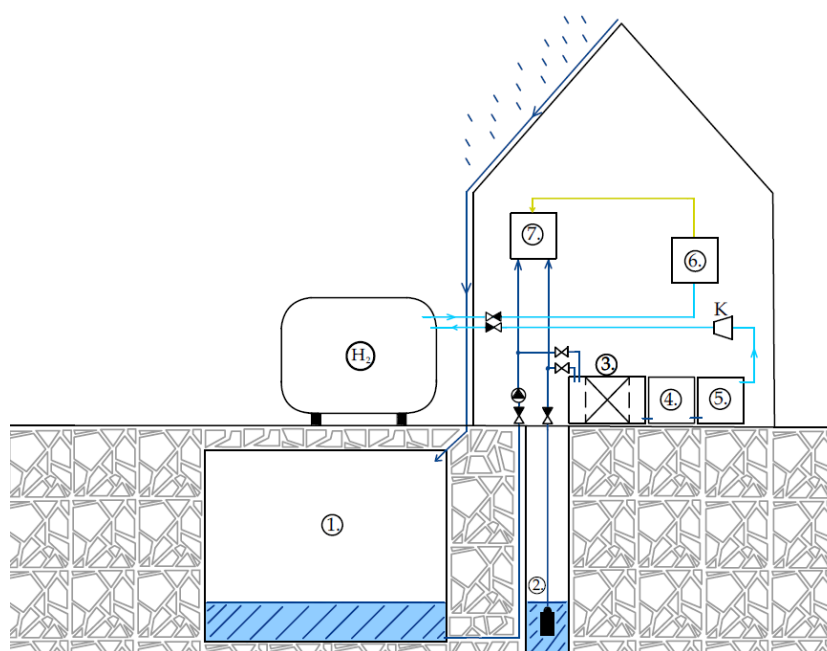
V průběhu celé práce bude celkový koncept doplňován o poznatky, týkající se funkčnosti a provozu systému, tak aby celý systém směřoval ke smysluplnosti.

Kapitola 1

Technologie zpracování vodíku

1.1 Vodíkový okruh

Vodíkový okruh námi řešeného objektu sestává ze systému úpravy vody, elektrolytické části, zajišťující zpracování vodíku (elektrolyzér, palivový článek), vodíkového úložiště. Toto řešení má poukázat na možný alternativní způsob provedení energetické soběstačnosti budov. To představuje výhodu z hlediska udržitelnosti technologií a celkového dopadu na životní prostředí. Diagram vodíkového okruhu je vyobrazen níže:



Obrázek 1.1: Diagram vodíkového okruhu

1. Zásobárna dešťové vody; 2. Vodní vrt s kalovým čerpadlem; 3. Filtrace a demineralizace vody; 4. Chemická úprava vody - ozonizace; 5. Elektrolyzér; H_2 Vodíkové úložiště; 6. Palivový článek; 7. Domácnost

Dle diagramu si můžeme povšimnout, že zdroje vody pro náš projekt jsme zvolili vodní vrt s kalovým čerpadlem a zásobárna dešťové vody.

1.2 Úprava vody

Aby byla voda vhodná pro výrobu vodíku, musí být patřičně ošetřena tak, aby nečistoty nezpůsobovaly nežádoucí chemické reakce a nesnižovaly tak účinnost celého procesu.

Pro úpravu vody v našem koncipovaném projektu máme, z důvodu odběru vody z hloubkového vrtu a vody dešťové, filtr mechanických nečistot. Následně pak musí proběhnout demineralizace a desinfekce odebírané vody. To je zajištěno ozonizací vody pro desinfekci a reverzní osmózou pro demineralizaci. Reverzní osmóza je proces, při kterém je pod tlakem přes pórovitou membránu filtrována voda. Póry takové membrány jsou natolik malé, že jimi projde pouze molekula vody a veškeré ostatní minerální složky na ní zůstanou zachycené.[1]

1.3 Elektrolyzér

Obecně je elektrolyzér zařízení pro chemickou reakci způsobenou protékajícím elektrickým proudem skrze elektrolyt. V teorii se jedná o zařízení schopno rozdělit látku rozpuštěnou v elektrolytu, nebo elektrolyt samotný, na kladné a záporné ionty, resp. rozdělit látku na její dílčí komponenty - v našem případě vodík a kyslík.[2]

Při elektrolýze vody je na elektrody přivedeno stejnosměrné napětí, které musí být při pokojové teplotě vyšší než 1,229 V. To zapříčiní samovolnou chemickou reakci disociace vody. Nově vzniklé ionty, vodíku a kyslíku, dorazí iontovým prouděním na elektrody, na kterých se hromadí. Tam znovu vytvářejí molekuly plynu, které se následně uvolňují pryč z elektrolytu. Uvnitř elektrolytu zároveň probíhá zpětná rekombinace molekul vody kvůli silným oxidačním vlastnostem kyslíku - vodík oxiduje na vodu/vodní páru.[3] Z důvodů udržení reakce při ekonomickém míře bývá na elektrodách naprášena katalyzátor - Platina. [4]

1.3.1 Termodynamika elektrolýzy vody

Pro námi zvolené referenční ambientní podmínky - atmosferický tlak 101325 a teplota 25 °C, probíhá chemická reakce rozkladu vody takto (veškeré teoretické podklady referenčním podmínkám podléhají tzn. nebereme v úvahu vysoké teploty):[3]



Pokud uvažujeme, že je tato chemická reakce vratná a izotermická poté platí:[3]

$$\Delta G(T) = \Delta H(T) - T\Delta S(T) \quad (1.2)$$

Kde $\Delta H(T)$ [J/mol] je entalpická výměna chemické reakci. Reakce rozdělení molekuly vody je endotermická kde $\Delta H(T)$ je celkové množství energie, které musí být dodáno, aby disociace vody proběhla. $\Delta S(T)$ [J/mol/K] je změna entropie, ta je pozitivní, neboť jeden mol vody se změní na 1.5 mol plynů. T [K] je teplota. $\Delta G(T)$ je Gibbsova volná entalpie, ta v tomto případě reprezentuje množství elektřiny, která je společně s daným množstvím tepla $T\Delta S(T)$ potřebna pro disociaci vody.

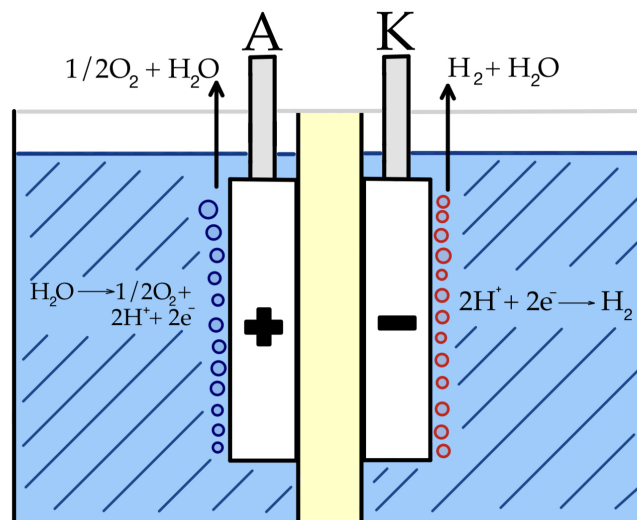
Elektrická práce nutná pro disociaci 1 mol vody je dána vztahem:[3]

$$\Delta G_T^0 = nFU^0 \quad (1.3)$$

Kde U^0 [V] je standardní termodynamické napětí, které je pro vodu o 25 °C $U^0 = 1,229V$; n je počet přenesených elektronů v reakci pro zachování rovnováhy; F je Faradayova konstanta.

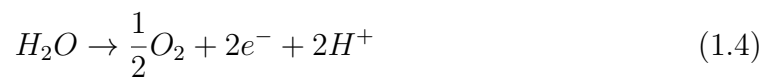
1.3.2 Elektrolýza PEM

Jedná se o typ elektrolýzy, která je specifická polymerní membránou nazývanou PEM¹ (proton-exchange membrane), česky - protonově vodivá membrána, či SPE² (solid-polymer electrolyte membrane). Tato polymerní membrána prokazuje vodivé vlastnosti pro protony/ionty, což zajišťuje specifický průběh elektrolýzy[3], který je nastíněn níže. Topologie PEM elektrolýzérů je následující:



Obrázek 1.2: PEM elektrolýzér

Mezi pórovité elektrody ponořené v elektrolytu je vložena polymerní membrána - PEM Chemická reakce v PEM elektrolýzérů:



Tento systém dosahuje hodnoty 80% entalpické účinnosti při hustotě proudu 1.0 – 1.5 A/cm². PEM elektrolýzéry jsou schopny vyrábět vodík o vysoké čistotě. Hlavním znečištěním je kyslík. U této technologie máme možnost provozovat reakci při vyšším tlaku. To je pro náš projekt hlavně přínosné z hlediska energetické a finanční náročnosti. Kompresor pro natlakování vodíku tím pádem spotřebuje méně elektrické energie při uskladnění. Nevýhodou tohoto typu elektrolýzy je, že při vyšších hodnotách tlaku dochází k difúzi plynů skrze membránu, tedy k nebezpečným směsím kyslíku a vodíku. V tomto ohledu hraje roli i tloušťka membrány.

¹Proton vodivá membrána (*Proton-exchange membrane*)

²Pevná polymerní elektrolytická membrána (*solid-polymer electrolyte membrane*)

U tenčích membrán dosahujeme vyšších hodnot proudové hustoty, ale průnik plynů při vysokém tlaku je pravděpodobnější. Při použití tlustší membrány nedochází při vyšších tlacích k mísení plynů, snižuje se však proudová hustota.[5]

1.3.3 Účinnost PEM elektrolýzy

Energetická účinnost elektrolyzátoru je dána jako podíl energie, která je potřeba k rozložení 1 mol vody za reverzibilních podmínek U_m , ku veškeré energii použité pro průběh procesu U.

$$\eta_U = \frac{U_m}{U} \cdot 100\% \quad (1.6)$$

Faradaická účinnost reprezentuje část proudu procházející skrze elektrochemický článek způsobující disociaci vody[6].

$$\eta_F = 1 - \frac{i_{loss}}{i} = 1 - \frac{2 \cdot F \cdot (j_{H_2,loss} + 2 \cdot j_{O_2,loss})}{i} \quad (1.7)$$

Kde $j_{H_2,loss}$ a $j_{O_2,loss}$ jsou toky vodíku a kyslíku procházející skrze polymerní membránu.

Celková účinnost PEM elektrolýzy je pak dána součinem předchozích účinností[6].

$$\eta = \eta_U \cdot \eta_F \quad (1.8)$$

1.4 Uskladnění vodíku

Uskladnění vodíku ve vysokotlakých nádobách v České republice podléhá ČSN 07 8304 - Tlakové nádoby na plyny. V této normě se pojednává o uskladnění hořlavých plynů v tlakových nádobách. To se vztahuje k našemu projektu jako k malému otevřenému skladu hořlavých plynů, tj. skladu do 2500 litrů vodního objemu.[7] Tlakové nádoby samotné ČSN EN 13445-1.[8]

Pro uložení vodíku se využívají bezešvé tlakové nádoby z nízkouhlíkaté nebo legované oceli, nebo také kompozitní tlakové nádoby s polymerním vnitřním povrchem.[9] Pro náš projekt zvolíme zmíněnou tlakovou nádobu o vodním objemu 2500 litrů. Naše instalace podléhá zmíněné normě pro malé otevřené sklady vodíku. Jedinou pro nás relevantní informací je, že je nutno takovou tlakovou nádobu skladovat v minimální vzdálenosti obytných budov 12 m.[7]

Při uskladnění vodíku v tlakových nádobách musíme brát v potaz jeho unikání, a tomu také přizpůsobit tlak při kterém je uskladněn. Pokud totiž pro uskladnění použijeme hliníkovou nádobu s kompozitním obalem zalitým do epoxidové pryskyřice, tak maximální objemová hmotnost vodíku v nádobě dosahuje 5%. Jsme tak schopni do 10 litrové nádoby vodního objemu natlakovat maximálně 0.5 kg vodíku. Pokud však budeme brát v potaz připojení manometru a ventilu, jsme schopni dosáhnout maximálně 3 - 4% objemové hmotnosti. U nádoby pro uskladnění vodíku o vodním objemu 2500 litrů jsme schopni uskladnit 93,75 kg při 350 bar.[9][10]

1.4.1 Unikání vodíku

Jedním z hlavních problémů oproti nebezpečí výbuchu z důvodu hořlavosti vodíku, je také velikost jeho molekuly. Ta je přibližně osmkrát menší než molekula methanu. Proniknutí skrze stěny tlakové nádoby, místa měření tlaku, či ventilů je pravděpodobnější. To z globálního hlediska přináší nezanedbatelný problém, neboť se ve studiích společnosti EDF³ (environmental defense fund) hovoří o únicích vodíku od 1-10 % původního skladovaného vodíku při použití technologií normovaných na methan/zemní plyn. Dle EDF by 10% únik celkové světové výroby způsobil oteplení planety o 0,1-0,4 °C do roku 2050.[11] Je tedy nutné upravit stávající plynovody tak, aby byly vhodné pro transport vodíku.

Z hlediska bezpečnosti jsme se rozhodli situovat vodíkový sklad venku. Vzhledem k rozptylovým vlastnostem vodíku - 14krát lehčí než vzduch, venku nedochází k jeho hromadění, tím pádem nepředstavuje nebezpečí výbuchu.

1.5 Palivový článek

Jedná se o zařízení pro přeměnu chemické energie přímo na energii elektrickou pomocí oxidačně-redoxní reakce.[2] Konkrétně se jedná o oxidaci vodíku, a redukci kyslíku.

Reakce na anodě:



Reakce na katodě:



Tento princip je obdobný pro všechny druhy palivových článků. Liší se pouze palivem a materiálem elektrod.[12] Následující obrázek popisuje průběh výroby elektrické energie:

Sumární reakce je tedy:



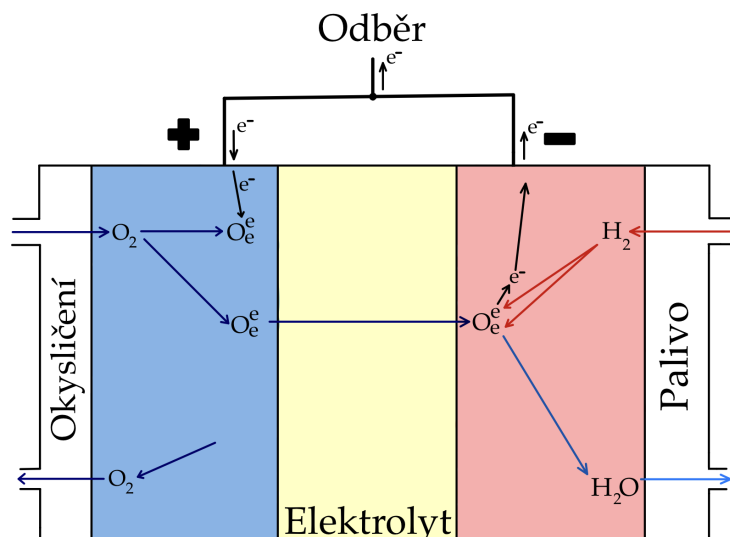
Kyslík je přiváděn do oblasti katody, kde se pomocí dvojice volných elektronů redukuje na anion, který je přenesen elektrolytem skrze polymerní membránu k anodě. V prostoru anody přivedený vodík oxiduje s kyslíkovým aniontem za vzniku vody. Uvolněné elektrony jsou odvedeny z anody na katodu, přebytečné jsou odvedeny do vnějšího elektrického obvodu v podobě využitelného elektrického proudu.[12]

1.5.1 PEM palivový článek

Jedná se o nízkoteplotní palivový článek s intervalem provozních teplot mezi 60 - 130 °C.[10]

Tento typ palivového článku topologicky odpovídá PEM elektrolyzátoru, neboť je v obou těchto zařízeních použita technologie polymerní membrány. Ta slouží jako by-pass pro kyslíkové anionty mezi oblastmi elektrod. Elektrody jsou v podstatě tenká

³Fond ochrany životního prostředí (*Environmental defense fund*)



Obrázek 1.3: PEM palivový článek

vrstva katalyzátoru stlačená mezi vrstvou polymeru a elektricky vodivého podkladu - svodového plátu. Tento vícevrstvý systém se nazývá MEA⁴ - sestava membrána elektroda (membrane electrode assembly). Ten je stlačen mezi kolektorové desky, které plní funkci svodu elektrického proudu. Elektrody jsou v tomto zařízení porézní, neboť je pro průběh chemické reakce žádoucí, aby měly všechny reaktanční⁵ subjekty přístup k místu reakce - místo spojení všech třech komponent - svodové desky, katalyzátoru a polymerní vrstvy. Na vrstvě katalyzátoru totiž probíhá již zmíněná elektrochemická reakce.

Při použití více palivových článků v sérii pak kolektorové desky plní funkci separátoru.⁶[10] Katalyzátorem pro většinu aplikací je stejně jako u PEM elektrolýzy platina. [4]

Důležitým aspektem je odvod vody, která je odpadním produktem reakce. Ta by mohla způsobit zaplavení článku a zamezit tak přístup reaktančním plynům a průběhu elektrochemické reakce.[10]

1.5.2 Termodynamický popis článku

Termodynamický popis článku je obdobný termodynamickému popisu elektrolytické reakce. Pro přeměnu na elektrickou energii můžeme uvažovat pouze část, která je charakterizována změnou Gibbsovy reakční entalpie.[12]

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (1.12)$$

Kde ΔG je změna Gibbsovy volné reakční entalpie a ΔS je změna entropie reakce, ΔH je změna reakční entalpie.

⁴Sestava s membránovou elektrodou (*Membrane electrode assembly*)

⁵Reaktanční plyny jsou plyny, které mezi sebou reagují, popř. reagují s elektrony/protony. V našem případě se jedná o vodík a kyslík

⁶Separátor je část článku zajišťující oddělení jednotlivých článků tak, aby nedocházelo k nežádoucímu mísení plynů

1.5.3 Účinnost PEM palivového článku

Teoretická účinnost, která nezohledňuje nevratné děje průběhu reakce při referenčních podmínkách (25 °C, 101325 Pa), je definovatelná jako poměr maximálního množství energie možné k přeměně na elektrickou energii, čili Gibbsovu volnou entalpii ku slučovacímu teplu. Tato maximální teoretická účinnost je dána dle vztahu:[10]

$$\eta_{max} = \frac{\Delta G(T)}{\Delta H^0} \quad (1.13)$$

Pokud bychom brali v potaz veškeré nevratné děje - reálné podmínky reakce v palivovém článku (vlastní přeměny - zanedbáváme účinnost měniče na výstupu palivového článku), tak musíme uvažovat také účinnost napětovou a stupeň využití paliva. Napětová účinnost je poměr skutečného napětí ΔU ku teoretickému napětí ΔE , které je schopen palivový článek vyrobit:[10]

$$\eta_U = \frac{\Delta U}{\Delta E} \quad (1.14)$$

Teoretické napětí článku je pak dáno jako:

$$\Delta E = -\frac{\Delta G(T)}{n \cdot F} \quad (1.15)$$

Stupeň využití paliva η_F , někdy také nazýván Faradaickou účinností, udává poměr mezi množstvím využitého paliva ku celkovému množství paliva. Ten se pro vodíkové články blíží 100%. Lze zjistit pouze experimentálně.[12]

Celková vlastní elektrochemická účinnost se udává jako součin výše zmíněných účinností, tedy:[10]

$$\eta_{FC} = \eta_{max} \cdot \eta_U \cdot \eta_F \quad (1.16)$$

1.5.4 Tepelná emisivita reakce

Pro naši aplikaci bude hrát roli také teplo uvolněné při výrobě elektřiny v palivovém článku. To je matematicky definováno jako:[12]

$$q_{FC} = -\eta_F \cdot \Delta H(T_{FC}) - w_{FC} \quad (1.17)$$

Kde využitelná elektrická práce:

$$w_{FC} = -\eta_{FC} \cdot \Delta H^0 \quad (1.18)$$

1.5.5 Využitelný proud a napětí článku

Ideální proud generovaný palivovým článkem dle Faradayova zákona pro elektrolýzu je dán jako:[12]

$$I_F = \frac{\Phi_f \cdot F \cdot n}{M_f} \quad (1.19)$$

Kde Φ_f je hmotnostní tok paliva; F je Faradayova konstanta, n je počet elementárních nábojů nutných pro disociaci jedné molekuly, M_f je molární hmotnost.

Proud který odpovídá reálné situaci je pak dán jako součin ideálního proudu s Faradaickou účinností.[12]

$$I_{real} = I_F \cdot \eta_F \quad (1.20)$$

Reálné napětí je ovlivněno ztrátami ohmickými, aktivačními a ztrátami koncentrační polarizací. Ohmickými ztrátami se rozumí ztráty způsobené průchodem proudu. Aktivačními ztrátami se rozumí energie, kterou musíme přivést do systému, aby reakce mohla vůbec proběhnout. Ztráty koncentrační polarizací jsou definovány dle ČSN EN ISO 8044 jako část polarizace elektrody článku způsobená změnami koncentrace vyvolanými průchodem proudu elektrolytem.[13]

Reálné napětí je dáno tedy jako:

$$\Delta U = \Delta E - i \cdot R' \quad (1.21)$$

Kde R' je náhradní odpor pro výše zmíněné ztráty a i je konkrétní hodnota generovaného proudu, ke které je vztažen náhradní odpor R' . [12]

1.6 Možnosti systému

Zřejmá možnost provozu by, z důvodu nutnosti okysličení palivového článku, bylo uložit již vyrobený kyslík do další tlakové nádoby. Ten pak do systému dodávat v čisté formě. Tato metoda se používá pouze pro systémy, kde není k dispozici vzdušný kyslík. Čili v kosmických, či podvodních aplikacích. Z ekonomických důvodů tedy pro naši aplikaci palivového článku volíme vzdušný kyslík - systém vodík-vzduch.[10]

Ve vzduchu je objemový obsah kyslíku přibližně 21 %, to má za důsledek snížení výkonu na výstupu palivového článku.

Systém vodík-vzduch má několik následujících variací:

1. Nízkotlaký systém s větrákem
2. Nízkotlaký systém s dmýchadlem
3. Vysokotlaký systém s kompresorem

Zřejmá nevýhoda všech systémů je nutná spotřeba elektrické energie na stlačení, regulaci tlaku či proudění vzduchu. To dále snižuje účinnost celého systému.

Kompresa je v tomto případě adiabatická - průběh komprese je natolik rychlý, že nedochází k výměně tepla s okolím. Neideální proces komprese je matematicky definován jako:[10]

$$W_{komp} = \frac{\dot{m}_{vzduch} \cdot c_p \cdot T_1}{\eta_{komp}} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (1.22)$$

Kde W_{komp} je výkonová hustota nutná pro kompresi, $\dot{m} [g \cdot s^{-1}]$ je hmotnostní tok, $c_p [J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}]$ je měrná tepelná kapacita, $T_1 [K]$ je teplota před kompresí, η_{komp} je účinnost komprese, $P_1 [Pa]$ je tlak před kompresí, $P_2 [Pa]$ je tlak po kompresi a k je Poissonova konstanta (pro dvouatomové plyny $k = 1.4$). Účinnost komprese je definována jako poměr ideální práce nutné pro adiabatické stlačení ku reálné práci potřebné ke stlačení plynu.

Pro určení reálné práce nutné pro stlačení plynu musíme také brát v potaz mechanické a elektrické ztráty použitých přístrojů. Celková práce je např. ovlivněna

mechanickou a elektrickou účinností kompresoru atd. Matematický vztah pro určení celkového výkonu pro stlačení plynu je následující:[10]

$$W_i = \frac{W_{komp}}{\eta_{mech} \cdot \eta_{el}} \quad (1.23)$$

Výkonová hustota na výstupu celého systému je tedy rozdílem výkonové hustoty článku a výkonové hustoty dodané použitým přístrojem při procesu.

$$W_{out} = W_{FC} - W_i \quad (1.24)$$

Účinnost celého systému je dána jako:

$$\eta_{sys} = \eta_{FC} \frac{W_{out}}{W_{FC}} \quad (1.25)$$

1.6.1 Výpočet účinnosti systému

Tlak, který budeme uvažovat pro skladování námi vyrobeného vodíku 35 MPa, je nutné regulovat na tlak, při kterém provozujeme palivový článek. Ideální pracovní tlak pro PEM palivový článek je v rozmezí 300 až 400 kPa.[9] Stechiometrický poměr (látky vstupující ku vystupujícím) kyslíku je 2. Pokud uvažujeme proudovou hustotu $i = 0.4 A/cm^2$, tak dle polarizační křivky [14] palivového článku bude napětí článku při daném tlaku 300 kPa rovno přibližně 650 mV. Při použití šroubového kompresoru můžeme uvažovat účinnosti $\eta_{komp} = 0.7$. [15] Koeficient odporu kyslíku $r_{O_2} = 0.21$. [10] Na výstupu uvažujeme naše referenční podmínky - teplota 25 °C, tlak 101325 Pa.

Vztah pro určení hmotnostního toku vzduchu do palivového článku je dán jako:[10]

$$\dot{m}_{vzduch} = \frac{S_{O_2}}{r_{O_2}} \frac{M_{vzduch}}{4F} i \quad (1.26)$$

Kde S_{O_2} je Stechiometrický poměr, M je molární hmotnost vzduchu $M = 28.97$ g/mol, F je Faradayova konstanta a i je proudová hustota.

Pro výpočet dále použijeme vztah č. 1.23 pro výpočet výkonové hustoty potřebné pro stlačení vzduch, mechanickou účinnost kompresoru zanedbáváme. Výkonovou hustotu palivového článku uvažujeme jako součin hodnot napětí a proudové hustoty odečtené z polarizační křivky palivového článku. Dále použijeme vztah č. 1.25 pro výpočet výkonové hustoty na výstupu článku a vztah č. 1.26 pro výpočet celkové účinnosti systému.

Hmotnostní tok vzduchu:

$$\dot{m}_{vzduch} = \frac{S_{O_2}}{r_{O_2}} \frac{M_{vzduch}}{4F} i = \frac{2}{0.21} \frac{28.97}{4 \cdot 96485.33} 0.4 = 2.859 \cdot 10^{-4} \cdot g \cdot s^{-1} \cdot cm^{-2}$$

Výkonová hustota kompresoru:

$$W_{komp} = \frac{\dot{m}_{vzduch} \cdot c_p \cdot T_1}{\eta_{komp}} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = \frac{2.859 \cdot 10^{-4} \cdot 1.298.15}{0.7} \left[\left(\frac{300}{101.325} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} - 1 \right] = 0,0443 W cm^2$$

Celková výkonová hustota:

$$W_{out} = U \cdot i - W_{komp} = 0.650 \cdot 0.4 - 0.0443 = 0.216 W cm^2$$

Celková účinnost systému pokud uvažujeme maximální produkované napětí článku 1.5 V, tak dle vztahu č. 1.26

$$\eta_{sys} = \eta_{FC} \frac{W_{out}}{W_{FC}} = \frac{0.65}{1.5} \frac{0.216}{0.65 \cdot 0.4} = 0.36$$

Účinnost při těchto předpokládaných podmínkách nám vychází přibližně 36%. Můžeme si povšimnout, že se tak děje hlavně z důvodu, že kompresí vzduchu spotřebujeme cca 20 % celkového výkonu článku.

Kapitola 2

Energetická bilance projektu

2.1 Identifikace objektu

Objekt se nachází v obci Čičenice, okres Strakonice v Jihočeském kraji, číslo popisné 70. Jedná se o starý dům, který v minulosti fungoval jako zemědělské/kovářské stavení. V objektu se nachází hlavní obytná budova se kterou přímo sousedí stodola. Na stodolu je kolmo přidružená budova bývalých chlévů. Rozmístění objektu je dle následujícího obrázku:



Obrázek 2.1: Letecký snímek objektu[16]

Pro instalaci FVP¹ byla vybrána střecha obytné budovy a stodoly, která směřuje na jihovýchod - azimut naší budovy je 130 °. Střecha objektu je celoročně nezastíněna a bez střešních oken. Její využitelná plocha je tedy přibližně 155 m² se sklonem 45°.

Jedná se o cihlovou stavbu. Budova je nezateplena, zateplený je pouze strop na půdu - izolace 100 mm a podlaha do sklepů - izolace 80 mm. Obytná plocha budovy je přibližně 106,25 m². Místnosti jsou totiž lichoběžníkové a tedy špatně měřitelné. Objem obytných prostor je přibližně 332 m³. V objektu je k dispozici vodní vrt. Stav spodní vody je v obci Čičenice nadprůměrný. Zároveň bude k dispozici podzemní nádrž na dešťovou vodu.

2.1.1 Dostupné prostory pro techniku

Pro uskladnění techniky pro zpracování vodíku jsme zvolili budovu chlévů. Využitelná plocha uvnitř budovy je přibližně 80 m², která vyhovuje uskladnění a provozu všech technologií pro zpracování vodíku vyjma uskladnění. To je dle bezpečnostních norem pro uskladnění hořlavých látek situováno venku, ve vzdálenosti 12 m od obytné budovy směrem do zahrady.

2.2 Odhad spotřeby

Pro naši koncipovanou domácnost jsme uvažovali většinu elektrických spotřebičů od firmy Siemens[17], která v datasheetech udává hodnoty spotřeby energie. Zároveň jsme se rozhodli nepoužít spotřebiče, které nejsou nezbytně nutné. Použili jsme některé kombinované spotřebiče jako například digestoř vestavěná do indukční desky. Spotřebiče, které jsme se rozhodli vyřadit jsou mikrovlnná trouba, rychlovarná konvice či kávovar.

Pro veškeré spotřebiče jsme volili co nejlepší energetické třídy účinnosti. To je, dle směrnice 32012L0027 Evropského parlamentu a Rady 2012/27/EU ze dne 25. října 2012 o energetické účinnosti, tedy třída B a výše.[18] Každý spotřebič má dle této směrnice jinou stupnici energetické účinnosti, ale zákonitě se třídy udávají od nejlepší A do nejhorší F či G. Tyto třídy zohledňují jednotlivé parametry spotřebičů jako například spotřeba pro myčku v kWh vztažená na cyklus.

Zároveň je nutné si uvědomit, že jedním z energeticky nejnáročnějších spotřebičů, pro námi koncipovaný projekt, je PEM elektrolyzátor. Proto, je z hlediska provozu nutné používat elektrolyzátor v čase nejvyšších výkonů FVE.

2.2.1 Elektrické spotřebiče

Následující tabulka nastiňuje seznam použitých spotřebičů a jejich přibližnou denní spotřebu energie v kWh. U spotřebičů, které se nepoužívají každodenně, uvažujeme průměr spotřeby na den. Celá spotřeba je koncipována pro čtyř člennou rodinu.

V sekci Ostatní, viz. Tabulka č. 2.1, jsou uvažovaným spotřebičem elektrické energie všechna osobní zařízení jako telefon laptop či sluchátka, u kterých se neřeší třída elektrické účinnosti. Jedno nabití těchto zařízení se pohybuje mezi 0,026 - 0,078 kWh. Součástí sekce ostatní je také například WIFI router se spotřebou přibližně

¹Fotovoltaický panel (*Photovoltaic cell*)

| Zařízení | Tř. en. účinnosti | $E_{jmen.}$ (kWh) | Vztaženo k | E_{den} (kWh) |
|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|-----------------|
| Pračka | A | 4,167 | 1 cyklus - 9kg | 1,319 |
| Myčka | B | 0,540 | 1 cyklus | 0,540 |
| Sporák | B | 0,185 | 1 kg | 0,740 |
| Trouba | A+ | 0,900 | 1 hod při 200 °C | 0,26 |
| Lednice | A | 0,285 | 1 den | 0,285 |
| Osvětlení - LED | A++ | 0,009 | 1 hodina | 0,360 |
| Čerpadla | - | 80 | 1 rok | 0,22 |
| Televize | E | 190 | 1000 hod | 0,76 |
| Ostatní | - | 0,412 | 1 den | 0,412 |
| Celkem | - | - | - | 4,896 |

Tabulka 2.1: Průměrná denní spotřeba jednotlivých spotřebičů v kWh

0,013 kWh na den. Také jsou zde zohledněny ostatní aktivity typu sekání trávy atd. U sporáku, jehož spotřeba je vztažena k jednomu kilogramu ohřívání látky, uvažujeme průměrnou evropskou denní spotřebu jídla 2,13 kg. Ohřívanou část na jednoho člověka na den jsme odhadli na 1 kg. Průměrná délka noci je přibližně 12 hodin, průměrná délka spánku denně je 8 hodin. Můžeme tedy uvažovat průměrně 4 hodiny svícení na den. Celková denní spotřeba je pak přibližně 4,896 kWh.

2.2.2 Provoz elektrolyzéry

K dispozici máme z naší FVE, s uvažovanou využitelnou plochou $155 m^2$, výkon dosahující maximální hodnoty 25 kWp. Pro odhad výkonů v jednotlivých obdobích roku, které podléhají zároveň parametrům střechy dle kapitoly 3.1 Identifikace objektu, jsme použili volně dostupný online nástroj globalsolaratlas.info. [19] Tento nástroj je schopen pro naši instalaci, dle zadaných parametrů (souřadnice, náklon střechy atd.), odhadnout generovanou energii dle měsíčních průměrů v rámci denní hodiny. Tu pak můžeme přepočítat na výkon generovaný FVE. Celoroční průměrné množství generované energie na den je 68,5 kWh. Generované průměrné množství energie dle měsíců:

Pokud uvažujeme spotřebu elektrolyzéry na produkci vodíku $72,62 kWh/kg$, a nepoužívali žádnou elektrickou energii vyrobenou FVE na napájení domácnosti, tak jsme průměrně za rok schopni vyrobit 326,7 kg vodíku (denně 0,89 kg). Produkce vodíku a tím pádem spotřeba elektrolyzéry se odvíjí od množství generované energie FVE.

2.3 Odhad denního odběrového diagramu

Odhad denního odběrového diagramu je odlišný pro všední dny, víkend, roční období a je také ovlivněn počasím. Proto je nutné odhadnout kdy a jak dlouho jsou jednotlivé spotřebiče domácnosti používány. Pro odhad používání uvedených přístrojů jsme použili vlastní kvalifikovaný odhad. Jedná se o koncept pro čtyř člennou rodinu. Odhad jsme prováděli, dle pravděpodobné přítomnosti obyvatel domácnosti kvůli vytápění a dle vlastního uvážení z hlediska časových úseků používání jednotlivých spotřebičů. Zároveň jsme pro odhad použili data zprostředkovaná fakultou - katedrou elektroenergetiky (přiloženo v přílohách).

| Měsíc | Energie (kWh) |
|----------|---------------|
| Leden | 30,8 |
| Únor | 51,8 |
| Březen | 71,3 |
| Duben | 93,3 |
| Květen | 97,4 |
| Červen | 101,1 |
| Červenec | 99,5 |
| Srpen | 95,2 |
| Září | 74,3 |
| Říjen | 52,1 |
| Listopad | 30,1 |
| Prosinec | 25,4 |
| Průměr | 68,5 |

Tabulka 2.2: Denní průměr generované energie FVE v každém měsíci

Pokud bychom uvažovali letní všední den, tak můžeme předpokládat, že dojde k odběru energie v brzké části dne. Pak v průběhu pracovních hodin nebude docházet skoro k žádnému odběru - uvažujeme-li standardní způsob zaměstnání osob obývajících prostory domu. Jediným spotřebičem v tuto dobu by byl systém elektrolyzéry vyrábějící vodík. V odpoledních a večerních hodinách pak bude docházet znovu k odběru elektrické energie.

Z hlediska energetické náročnosti vytápění objektu je zásadní zimní všední den. Vytápění je kontinuální v průběhu celého dne, vyjma času nepřítomnosti osob, to se minimum vnitřní teploty snižuje na 18 °C a snižuje se odběr. Před příchodem obyvatel zvýšíme výkon vytápění. Následkem toho je větší odběr. Výkon se postupně snižuje na hodnotu, při které trvale dosahujeme pokojové teploty 20 °C. Z hlediska svícení je zimní období také náročnější, neboť osvětlení domácnosti je třeba již od příchodu obyvatel. Pro vytápění jsme nuceni odhadnout kolik energie bude třeba pro vytopení celého obytného prostoru pro každý den topné sezóny. Topnou sezónu uvažujeme 232 dní.[20]

Na víkendovém denním diagramu odběru se projeví celodenní přítomnost obyvatel zvětšením celkového odběru. V zimních měsících je nutné celodenní vytápění. Zároveň se zvyšuje odběr elektrické energie z důvodu využívání osobních zařízení atp. V jarních, letních a podzimních měsících musíme uvažovat větší odběr z důvodu připojení zahradních přístrojů.

Pro odhad denního diagramu odběru v otopném období musíme odhadnout potřebné množství tepla pro vytopení objektu. Pro výpočet jsme zvolili denostupňovou metodu, která vychází z tepelných ztrát budovy, klimatických podmínek v nichž je budova situována, zohledňuje tepelnou akumulaci budovy a tepelné ztráty prostupem a průnikem (větráním). Matematická definice této metody je následující:[21]

$$Q_{H,a} = \frac{24 \cdot \phi_{HL} \cdot \epsilon \cdot D}{\Theta_{is} - \Theta_e} \quad (2.1)$$

Kde $Q_{H,a}$ (kWh) je spotřeba tepla za rok (kWh/rok), ϕ_{HL} je tepelná ztráta budovy kWh, ϵ je opravný součinitel na snížení teploty, zkrácení doby vytápění, nesoučasnost tepelné ztráty větrání a prostupem, D je počet denostupňů ($k \cdot den$), Θ_{in} je průměrná vnitřní teplota a Θ_e je venkovní teplota.

Nejprve je nutné vypočítat tepelné ztráty objektu. Na to jsme použili volně dostupnou kalkulačku ze stránek tzb.info,[22] ve které je následovně vypočítaná i potřeba energie pro vytopení celé budovy za rok. Budova je koncipována jako konstrukce s běžnými tepelnými mosty. Hodnoty zadané a vypočítané jsou vyneseny do tabulek, viz. tabulka č. 2.3, tabulka č. 2.4 a tabulka č. 2.5. Hodnoty činitelů prostupu tepla a činitele teplotní redukce byly uvažovány dle normových hodnot součinitele prostupu tepla jednotlivých konstrukcí dle ČSN 73 0540-2:2011 Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky.[23] Intenzita větrání byla zvolena dle ČSN EN 15 665/Z1 - Požadavky na větrání obytných budov. [24]

| | | |
|--|--------|-----------------|
| Venkovní teplota v zimním období | -17 | °C |
| Délka otopného období | 236 | dní |
| Průměrná venkovní teplota v otopném období | 3,3 | °C |
| Převažující vnitřní teplota | 20 | °C |
| Objem budovy V | 332 | m^3 |
| Celková plocha A | 489,45 | m^2 |
| Celková podlahová plocha A_p | 106,25 | m^2 |
| Objemový faktor tvaru budovy A/V | 1,47 | m^{-1} |
| Trvalý tepelný zisk H^+ | 380 | W |
| Solární tepelný zisk H_s^+ | 897 | kWh/rok |
| Lineární tepelný most ΔU | 0,1 | $Wm^{-2}K^{-1}$ |
| Intenzita větrání | 1 | h^{-1} |

Tabulka 2.3: Specifika objektu

Objem budovy V je celkový vnější objem vytápěné části - nezahrnuje sklepy, půdy, garáže atd. Celková plocha A je součet všech vnějších ploch ohraničujících objem budovy. Trvalý tepelný zisk H^+ zahrnuje teplo generované domácími spotřebiči a teplo generované obyvateli. Solární tepelný zisk H_s^+ je teplo získané ozářením naší budovy sluncem. Byl odhadnut dle vyhlášky č. 291/2001 Sb.[25]

| Konstrukce | $U_i(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$ | $b_i (-)$ | $A_i(m^2)$ | $H_{Ti} = A_i \cdot U_i \cdot b_i(W \cdot K^{-1})$ |
|---------------------|------------------------------------|-----------|------------|--|
| Stěny | 1,1 | 1 | 39,25 | 43,2 |
| Podlaha nad sklepem | 0,43 | 0,45 | 106,25 | 18,9 |
| Střecha | 2,2 | 1 | 200 | 440 |
| Strop pod půdou | 0,31 | 0,6 | 106,25 | 8,8 |
| Okna | 2,5 | 1 | 10,2 | 25,5 |
| Veranda | 0,75 | 0,4 | 128 | 38,4 |

Tabulka 2.4: Ztráta jednotlivých částí objektu

U_i je součinitel prostupu tepla, A_i je celková plocha částí budovy, b_i je činitel teplotní redukce, který zohledňuje rozdíl teplot mezi interiérem a exteriérem a H_{Ti} je měrná tepelná ztráta prostupem. Celkové množství potřebné energie pro vytopení naší budovy v kWh/m^2 byl odhadnut následovně. Tato hodnota přiřazuje na energetickému štítku obálky budovy označení E - nevhodná budova.

$$\text{Měrná potřeba energie objektu} \mid 518,4 \mid kWh \cdot m^{-2}$$

Tabulka 2.5: Potřebné množství energie pro vytápění budovy

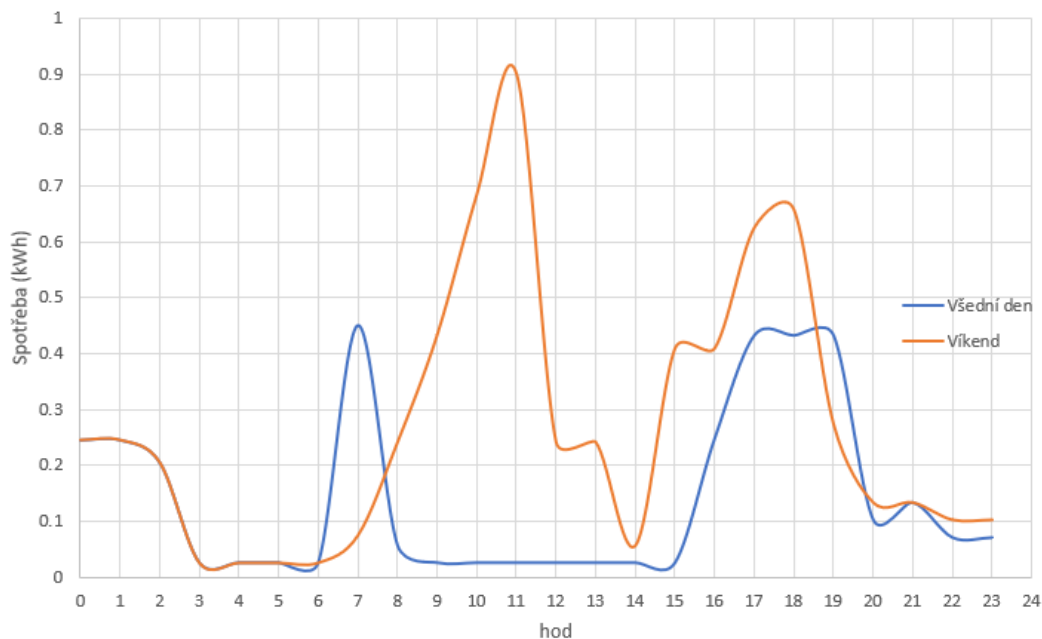
Pro odhad denního odběrového diagramu je také nutné se zaměřit, jakou průměrnou spotřebu mají za hodinu jednotlivé spotřebiče a v jakých hodinových intervalech se dané spotřebiče používají. K odhadu hodinové spotřeby jsme použili tabulku č. 2.1. Spotřebiče jako je pračka jsme zahrnuli do víkendové spotřeby. Elektrolyzátor je brán jako kategorie sama o sobě, jeho elektrická spotřeba se odvíjí od výkonu FVE v průběhu dne.

2.3.1 Neotopné období

Denní odběrový diagram v neotopném období uvažujeme tak, že v noci nemáme prakticky žádnou spotřebu elektrické energie. Možná je pouze spotřeba na nabíjení osobních zařízení - odběr 0,4 kWh. Wifi router je spotřebičem kontinuálním, odběr je stálý s přibližnou hodnotou 0,312 kWh/den. Stejně tak lednice s mrazákem. V ranních hodinách můžeme očekávat rozmezí cca dvou hodin používání většiny spotřebičů tj. čerpadla, sporák, osvětlení. Po odchodu obyvatelstva do zaměstnání či škol pak spotřeba energie klesá do doby sepnutí ohřevu a doplnění vyčerpané vody. Zároveň je spuštěn elektrolyzátor zatěžující naši FVE². Kolem 16:00 hodiny přichází obyvatelstvo domu, což zapříčiní odběr spotřebičů typu čerpadlo atp. Ta bude větší ihned po příchodu obyvatelstva a v časovém intervalu večere. Ve večerních hodinách se bude snižovat a zároveň se bude zvyšovat odběr spotřebičů jako jsou televize, laptop atd.

V čase víkendu, jak již bylo uvedeno v kapitole č. 2.3 Odhad denního odběrového diagramu, bude systém podléhat většímu odběru z důvodu používání zahradních spotřebičů.

Přibližný odběrový diagram pro všední den a pro víkendový den v letním období je následující:

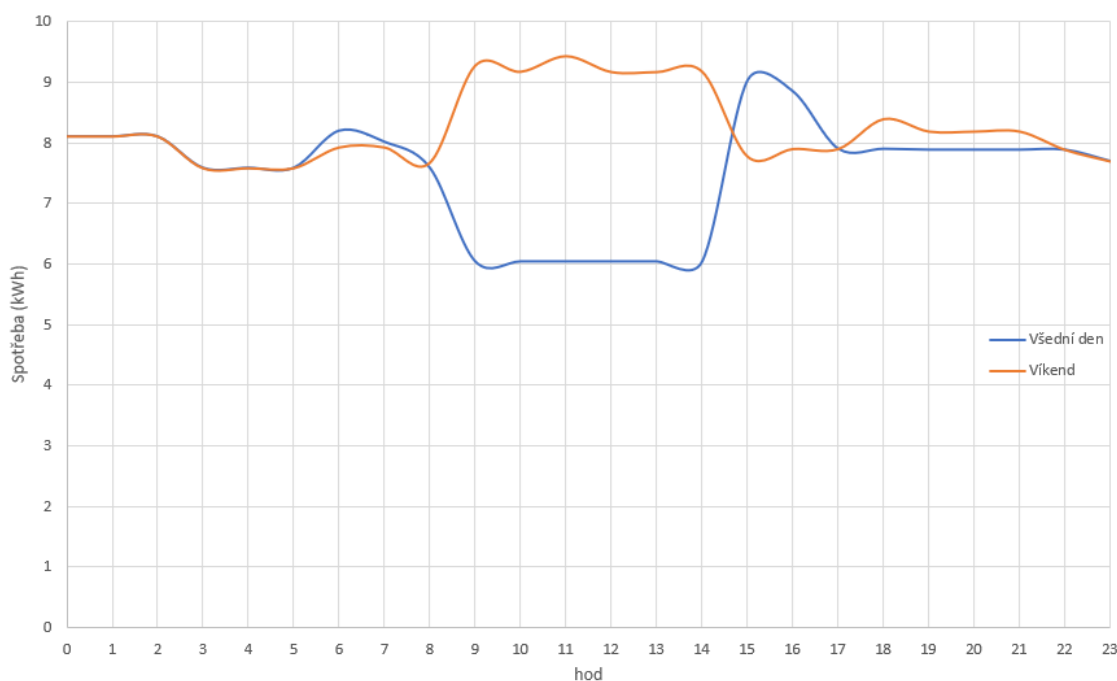


Obrázek 2.2: Přibližné odběrové diagramy v neotopném období

²Fotovoltaická elektrárna (*Photovoltaic powerplant*)

2.3.2 Otopné období

Pro otopné období největší energetický odběr způsobuje vytápění domácnosti. Způsoby vytápění můžeme uvažovat dva. Podlahové vytápění teplou vodou, či elektrické podlahové vytápění. Z hlediska účinnosti je výhodnější elektrické podlahové vytápění s účinností až 99 %. V ideálním případě by měla být roční spotřeba energie na jeden metr čtvereční podlahové plochy maximálně $80 \text{ kWh}/m^2$. [26] V našem případě se jedná o roční spotřebu, po zateplení mezi krokvelemi, o hodnotě $262 \text{ kWh}/m^2$. Otázkou, zda-li bychom byli schopni systém elektrického podlahového vytápění zásobovat energií, se budeme zabývat podrobněji v sekci 3. Návrh zásobování rodinného domu energií. Z hlediska vytápění teplou vodou uvažujeme systém ohřevu tak, že k ohřevu vody dochází zejména díky palivovému článku. K dosažení vyšší účinnosti potrubí volíme co nejkratší cestu k zásobníku teplé vody a co nejlepší izolaci. Na vytopení celé obytné plochy bychom potřebovali přibližně 80 l vody. [27] Tu z hlediska energetické náročnosti z důvodu způsobu ohřevu (teplo palivového článku jako terciální produkt) bereme jako energeticky nenákladový. Tepelným výkonem palivového článku a elektrolyzéro se budeme zabývat detailněji v sekci 3. Návrh zásobování rodinného domu energií. Následující graf v obrázku č. 2.3 znázorňuje denní odběrové diagramy v otopném období při použití elektrického podlahového vytápění pro roční spotřebě $262 \text{ kWh}/m^2$.



Obrázek 2.3: Přibližné odběrové diagramy v otopném období

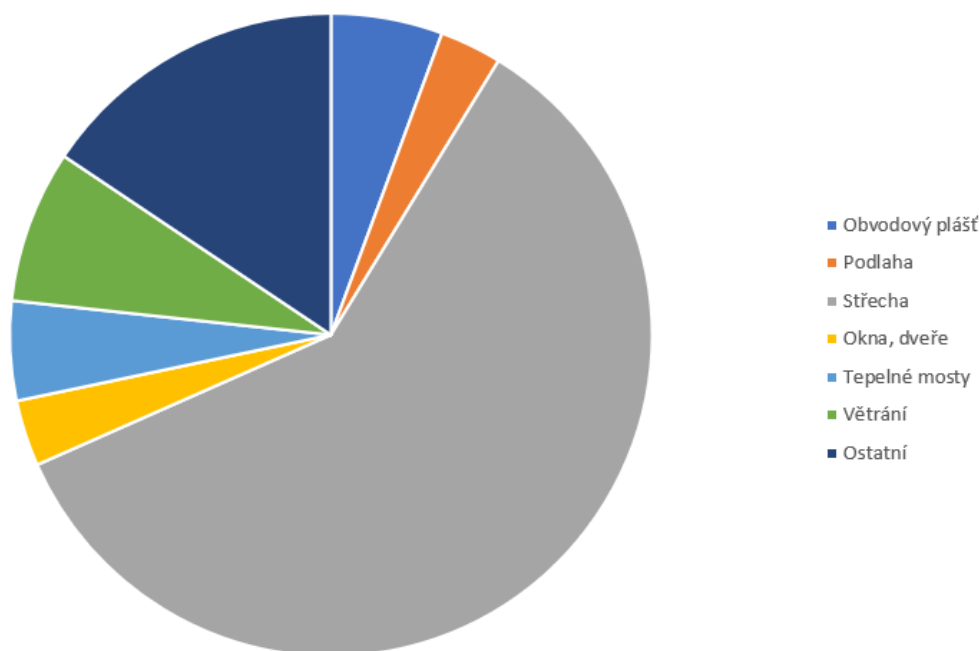
Z grafu si můžeme všimnout, že použití jakéhokoliv podlahového vytápění je velmi energeticky náročné, neboť k normální denní spotřebě musíme průměrně každý den otopného období připočítat průměrně 180 kWh spotřeby navíc. Pokud bychom uvažovali ohřívání otopné teplé vody pouze pomocí palivového článku, tak se finální spotřeba elektrické energie radikálně sníží. Otázkou zda-li jsme schopni vytopit budovu pouze touto tepelnou energií, se budeme blíže zabývat v kapitole č. 3 Návrh zásobování rodinného domu energií.

2.4 Tepelné požadavky

Tyto požadavky byly částečně zohledněny v kapitole 2.3 Odhad denního odběrového diagramu, kde bylo zjištěno, že se jedná o nevhodnou budovu, jejíž průměrná spotřeba energie na den otopné sezóny je přibližně 360 kWh na celou domácnost. Z hlediska našeho uvažovaného systému to způsobí vysoký energetický deficit, který by bez přídavných vytápěcích přístrojů nebyl dosažitelný. Při bližším zaměření na tepelnou ztrátovost našeho koncipovaného systému si můžeme všimnout, že většina tepelných ztrát celého objektu je způsobena prostupem tepla skrze střechu. Tepelná ztráta skrze střechu činí přibližně 16,9 kW. Jednotlivé ztráty v objektu jsou naznačeny v tabulce č. 2.6 a grafu č. 2.4.

| Typ konstrukce | Tepelná ztráta (kW) | Tepelná ztráta po zateplení (kW) |
|----------------|---------------------|----------------------------------|
| Obvodový plášť | 1,597 | 1,597 |
| Podlaha | 0,886 | 0,886 |
| Střecha | 16,939 | 2,139 |
| Okna, dveře | 0,944 | 0,944 |
| Tepelné mosty | 1,421 | 1,421 |
| Větrání | 2,181 | 2,181 |
| Ostatní | 4,436 | 4,436 |
| Celkem | 28,404 | 13,604 |

Tabulka 2.6: Tepelné ztráty jednotlivých konstrukcí domu před a po zateplení [22]



Obrázek 2.4: Jednotlivé tepelné ztráty domu[22]

Z grafu zjevně vyplývá, že většina tepla uniká střechou budovy. Nejlepším řešením by proto bylo zateplení střechy - nástřikové zateplení mezi krokvemi, to zapříčiní radikální zlepšení vlastností.

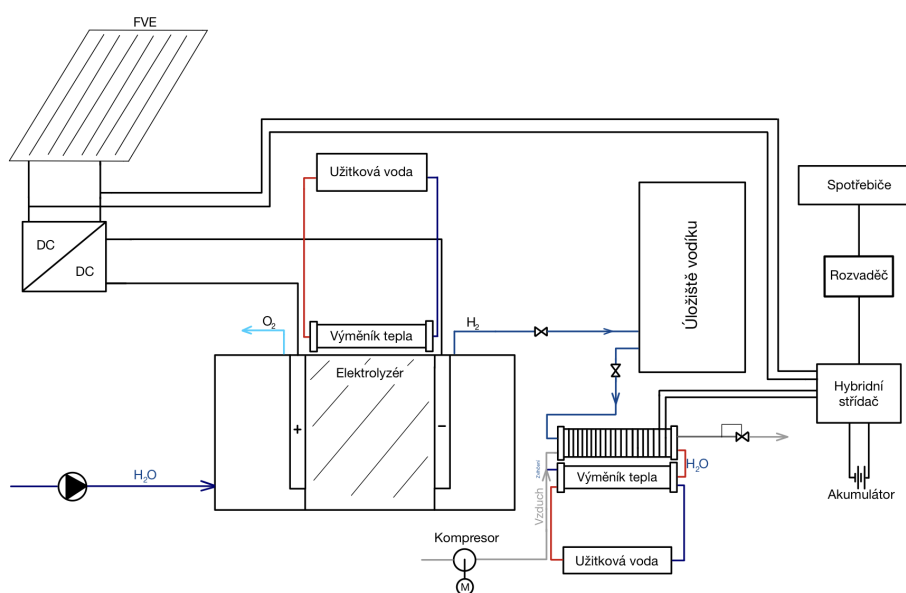
Tato úprava zapříčiní snížení měrné potřeby tepla z $518,4 \text{ kWh}/m^2$ za rok na $262 \text{ kWh}/m^2$ za rok, snížení tepelné ztráty z $28,404 \text{ kW}$ na $13,604 \text{ kW}$. Energetický štítek obálky budovy je místo nevhodná - E hodnocen jako úsporná - C1.[28]

Kapitola 3

Návrh zásobování rodinného domu energií

3.1 Logika využití komponent

Celý námi koncipovaný projekt je založen na principu kogenerační jednotky. Energetický model stojí na získání elektrické energie pomocí FVE pro rozklad vody na vodík a kyslík díky PEM elektrolyzáru. Probíhající chemická reakce, s danou účinností, způsobena průchodem elektrického proudu, vyrábí vodík, který je ukládán do tlakové nádoby. Zároveň se při reakci uvolňuje jisté množství tepla, které je využito pro ohřev vody užitkové a vody použité pro vytápění. Vodík je dále pomocí kompresoru tlakován na hladinu skladovacího tlaku danou normami ČSN, viz kapitola č. 1.4 Ukladnění vodíku. Při potřebě elektrické energie pro napájení spotřebičů je energie uskladněna ve vodíku pomocí stacku PEM palivových článků přeměněna na energii elektrickou. Ta je po modulaci stejnosměrného výstupu na střídavý a hladinu 230 V, 50 Hz přivedena ke spotřebičům domácnosti. Sekundárním produktem provozu palivového článku je voda.



Obrázek 3.1: Zapojení komponent na výrobu elektrické a tepelné energie

3.2 Odhad instalovaného výkonu

Odhad instalovaného výkonu jsme koncipovali jako odhad, který závisí zejména na výrobci použitých přístrojů. Účinnosti FVP různých výrobců se liší - závisí na kvalitě křemíku, kvalitě propojení panelů atd. (účinnost panelů se pohybuje v rozpětí 19-22 %). U FVE také záleží na parametrech plochy, na kterou je montována, jejím zastínění, sklonu atd.

PEM palivový článek je nezávislý na vnějších podmínkách. U něj záleží zejména na kvalitě resp. účinnosti polymerní membrány. Dosahuje maximální elektrické účinnosti do 50 %.[29] V následujících bodech je nastíněn odhad instalovaného výkonu FVE a PEM palivového článku resp. stacku palivových článků.

3.2.1 Fotovoltaická elektrárna

Využitelná plocha pro instalaci FVE elektrárny je 155 m^2 se sklonem 45° a azimutem 130° . To není z hlediska uložení ideální pozice. Ideální pozice pro FVE je sklon střechy 37° a azimut 180° . Z hlediska stínění je pozice naší FVE ideální, neboť nejsou v blízkosti stromy, které by vrhaly stín na panely v jakémkoli ročním období. Odhadovaný instalovaný výkon je pro plochu střechy našeho objektu 25 kWp. Odhad výkonu v jednotlivých ročních obdobích jsme odhadli, dle historického chování počasí v místě naší budovy. Odhad proběhl z dat, která jsou k dispozici z internetového portálu PVgis.com. Z dat odhadu výkonu naší FVE mezi roky 2015 - 2020, jsme zjistili následující:[30]

| hod | Leden | Únor | Březen | Duben | Květen | Červen | Červenec | Srpen | Září | Říjen | Listopad | Prosinec |
|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|-------------|------------|------------|------------|----------|------------|------------|
| 0-1 | | | | | | | | | | | | |
| 1-2 | | | | | | | | | | | | |
| 2-3 | | | | | | | | | | | | |
| 3-4 | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 4-5 | | | 0 | 0-9 | 0-627 | 15-759 | 0-662 | 0-176 | 0 | | | |
| 5-6 | | | 0-38 | 0-1166 | 77-1846 | 152-1964 | 105-1843 | 0-1313 | 0-529 | 0 | 0 | |
| 6-7 | | 0 | 0-1244 | 172-2648 | 323-3379 | 368-3390 | 289-3213 | 203-2369 | 75-1810 | 0-892 | 0-46 | 0 |
| 7-8 | 0 | 0-1331 | 0-2669 | 486-4068 | 0-4543 | 0-4607 | 0-4452 | 0-3840 | 0-3148 | 0-2255 | 0-1061 | 0-172 |
| 8-9 | 0-134 | 193-2711 | 537-3907 | 0-5275 | 784-5916 | 1113-6070 | 993-5743 | 646-4660 | 498-4252 | 0-3401 | 0-2190 | 57-1134 |
| 9-10 | 47-1110 | 402-3764 | 488-4972 | 965-6169 | 964-7166 | 0-7308 | 0-7051 | 1043-6149 | 844-5300 | 0-4213 | 258-2790 | 207-1895 |
| 10-11 | 0-2080 | 502-4462 | 895-5628 | 1102-7274 | 1070-8597 | 1093-8630 | 1466-8525 | 889-7135 | 736-5996 | 0-4558 | 369-3228 | 311-2418 |
| 11-12 | 238-2687 | 393-4842 | 934-6430 | 1372-8664 | 1389-9851 | 0-10236 | 0-9884 | 1053-8471 | 0-7174 | 0-5227 | 257-3378 | 314-2418 |
| 12-13 | 232-2878 | 0-4999 | 0-7142 | 0-10619 | 1076-12114 | 1302-12310 | 1085-12261 | 0-10661 | 0-8440 | 0-5462 | 215-3359 | 180-2218 |
| 13-14 | 204-2875 | 0-5236 | 0-9378 | 0-12716 | 0-13978 | 970-14302 | 971-13878 | 842-12508 | 593-10233 | 0-7291 | 155-3478 | 108-1971 |
| 14-15 | 136-2885 | 138-6280 | 532-10905 | 607-13721 | 0-14984 | 0-14302 | 746-15106 | 726-13209 | 450-11292 | 0-8316 | 0-4209 | 5-1477 |
| 15-16 | 35-2590 | 0-7158 | 148-11660 | 332-13858 | 507-15200 | 0-14904 | 507-14476 | 373-13398 | 227-10899 | 0-8093 | 0-2116 | 0-911 |
| 16-17 | 0-2868 | 0-6326 | 5-12212 | 103-14055 | 293-14701 | 562-15798 | 463-14510 | 138-12595 | 118-10370 | 0-3281 | 0 | 0 |
| 17-18 | 0-2671 | 0-1510 | 0-10602 | 0-12688 | 42-14053 | 338-14861 | 94-12542 | 0-10340 | 0-3255 | 0 | | |
| 18-19 | 0 | 0 | 0-882 | 0-8747 | 0-10941 | 0-15112 | 0-10509 | 0-4462 | 0 | | | |
| 19-20 | | | 0 | 0 | 0-5547 | 0-12885 | 0-3666 | 0 | | | | |
| 20-21 | | | | | 0 | 0-6809 | 0 | | | | | |
| 21-22 | | | | | | 0 | | | | | | |
| 22-23 | | | | | | | | | | | | |
| 23-24 | | | | | | | | | | | | |
| průměr (W) | 89 - 2178 | 163 - 4862 | 253 - 6262 | 343 - 8112 | 408 - 8965 | 348 - 12876 | 420 - 8645 | 397 - 7428 | 272 - 6292 | 0 - 4817 | 125 - 2586 | 131 - 1624 |

Obrázek 3.2: Rozptyl výkonů dle denní doby v měsíci z roku 2015-2020

Z grafu můžeme pozorovat, že nejhorší měsíce, co se týče výkonů FVE, jsou říjen, listopad, prosinec, leden a únor. V těchto měsících můžeme uvažovat prakticky žádný přísun elektrického výkonu pro výrobu vodíku.

Musíme tedy odhadnout jak dlouho jsme schopni fungovat bez přísunu nového vodíku resp. kolik jsme schopni vyrobit a kolik je potřeba elektrické energie. Čili jak moc jsme schopni uchovávat energii ve vodíku na tzv. horší časy.

Při stoprocentním využití energie z FVE pro výrobu vodíku můžeme očekávat, že jsme schopni vyrobit sezónně množství vodíku, které odpovídá maximální kapacitě

úložiště 2500 litrů vodního objemu při průběžném používání. To by znamenalo při tlaku 350 bar 93,75 kilogramů vodíku.

3.2.2 Palivový článek

V absolutní přeměně veškerého vyrobeného vodíku, 93,75 kg, máme k dispozici 3093,75 kWh (1 kg - 33 kWh)[31]. Při 36 % elektrické účinnosti palivového článku jsme tedy schopni vyrobit 1113,75 kWh elektrické energie. To by teoreticky, při dané denní spotřebě maximálně 6 kWh, vyšlo na 185,63 dní.

Pokud bychom uvažovali denní průměrnou spotřebu dle našeho odhadu, viz. tabulka č. 2.1, čili 4,896 kWh. A vytápění by bylo zajištěno alternativním způsobem. Energeticky bychom vyšli bez dalšího přísunu vodíku přibližně 227 dní.

Je zřejmé, že je nutné uvažovat provoz palivového článku z hlediska výkonu. Pokud bychom uvažovali vlastnosti článku dle kapitoly 1.6.1. Výpočet účinnosti systému tedy napětí článku 650 mV a proudovou hustotu 0,4 A/cm², tak abychom byli schopni vytvořit stejnosměrné napětí 230 V. Je proto nutné, vytvořit takzvaný stack¹ palivových článků. Jmenovité napětí zásuvek uvažujeme tedy 230 V. Počet palivových článků potřebných pro udržení takového napětí při napětí jednoho článku 650 mV je následující:

$$N = \frac{U_{sys}}{U_{FC}} = \frac{230}{0.65} = 354 \quad \text{článků}$$

Stack palivových článků je ve veřejném sektoru většinou k dostání v rozmezí výkonů 1-10 kW. 10 kW systém je pro naši aplikaci nejvhodnějším řešením, neboť při provozu několika energeticky náročných spotřebičů může příkon soustavy činit až 8 kW. Z hlediska výkonové rezervy volíme 10 kW systém. Zároveň z dynamiky palivového článku vyplývá, že nejsme schopni dostatečně rychle reagovat na výkonové špičky našeho systému. Proto jsme se rozhodli integrovat do systému akumulátor o kapacitě 5 kWh, která zajistí, že celý náš generátorový systém má charakter tvrdého zdroje a jsme schopni s proměnnou zátěží udržet stálou hodnotu výkonu.

Stejnoseměrný výstup stacku palivových článků je využit pro nabíjení záložního akumulátoru nebo je hybridním střídačem modulován na střídavý 50 Hz, 230 V. Při potřebě menšího výkonu je sepnuta menší část stacku palivových článků. Výstup je modulován znovu na jmenovité hodnoty soustavy.

3.2.3 Možnosti komponent

Z hlediska možností komponent je prakticky pouze výběr kvalitnějších komponent, která slibují vyšší hodnoty účinností. To je z hlediska FVE výběr panelů s nejvyšším špičkovým výkonem. To by dle nabízených FVP bylo do 450 Wp pro jeden panel.

Pro palivový článek bychom volili ten s nejvyšší účinností v poměru na velikost. Pokud totiž chceme vytvořit stack o počtu 355 sériově zapojených palivových článků a uvažujeme ideální tloušťku jednoho palivového článku 0,36 cm[32], pak by byl celý stack dlouhý 128 cm. Maximální elektrická účinnost PEMFC² dosahuje hodnot 50 %.[29]

¹stack- soubor sériově zapojených palivových článků

²PEM palivový článek (*PEM fuel cell*)

Účinnosti PEM elektrolýzy závisí na použité polymerní membráně. Nejvyšší účinnosti 73,7 % bylo dosaženo při použití membrány N117. [5] Ideálním řešením problému by tedy bylo použít elektrolyzátor s touto membránou. Samozřejmě je nutné zohlednit pořizovací cenu této technologie.

U měničů, na výstupu palivového článku a vstupu elektrolyzátoru, volíme měniče s nejvyšší účinností přeměny, tedy kolem 90 %.

U všech výše zmíněných přístrojů je tedy dobré zohlednit poměr cena výkon. Hraje roli i opravitelnost komponent, což bude zohledněno v kapitole 4. Technicko-ekonomické zhodnocení.

3.3 Vytápění

Jak již bylo výše zmíněno, na vytopení všech obytných prostor na 20 °C, potřebujeme průměrně za rok 262 kWh/m² tepelné energie. Tepelný zisk jsme uvažovali pouze pomocí palivového článku. Výpočet tepelné emisivity a následné zhodnocení, zda-li je potřeba doplňkových zdrojů tepelné energie, či jestli jsme schopni vůbec obytné prostory dostatečně vytopit zhodnocujeme v následujících kapitolách.

3.3.1 Výpočet tepelné emisivity palivového článku

Při výpočtu tepelné emisivity palivového článku budeme počítat dle vztahů v sekci 1.5.4 Tepelná emisivita reakce.

$$\begin{aligned} q_{FC} &= -\eta_F \cdot \Delta H(T_{FC}) - w_{FC} \\ w_{FC} &= -\eta_{FC} \cdot \Delta H^0 \end{aligned}$$

Při výpočtech uvažujeme změnu reakční entalpie pro rekombinaci vody při pokojové teplotě $\Delta H^0 = -241,8$ kJ/mol. Změnu reakční entalpie v závislosti na teplotě zanedbáváme - použijeme stejnou hodnotu jako pro ΔH^0 . Faradaickou účinnost uvažujeme $\eta_F = 0,99$ a elektrická účinnost palivového článku uvažujeme $\eta_{FC} = 0,36$.

Dosazení do vztahu pro výpočet tepelné emisivity:

$$q_{FC} = -\eta_F \cdot \Delta H(T_{FC}) - w_{FC} = -0,99 \cdot (-241,8) - 0,36 \cdot (241,8) = 152,33 \text{ kJ/mol}$$

To prakticky znamená, že při provozu palivového článku jsme schopni při účinnosti 36 % získat z každého molu reaktantů 152,33 kJ tepelné energie, při výrobě 87,05 kJ elektrické energie. Tedy při generaci 10 kWh elektrické energie získáme 17,8 kWh tepelné energie.

3.3.2 Doplňkové komponenty pro vytápění

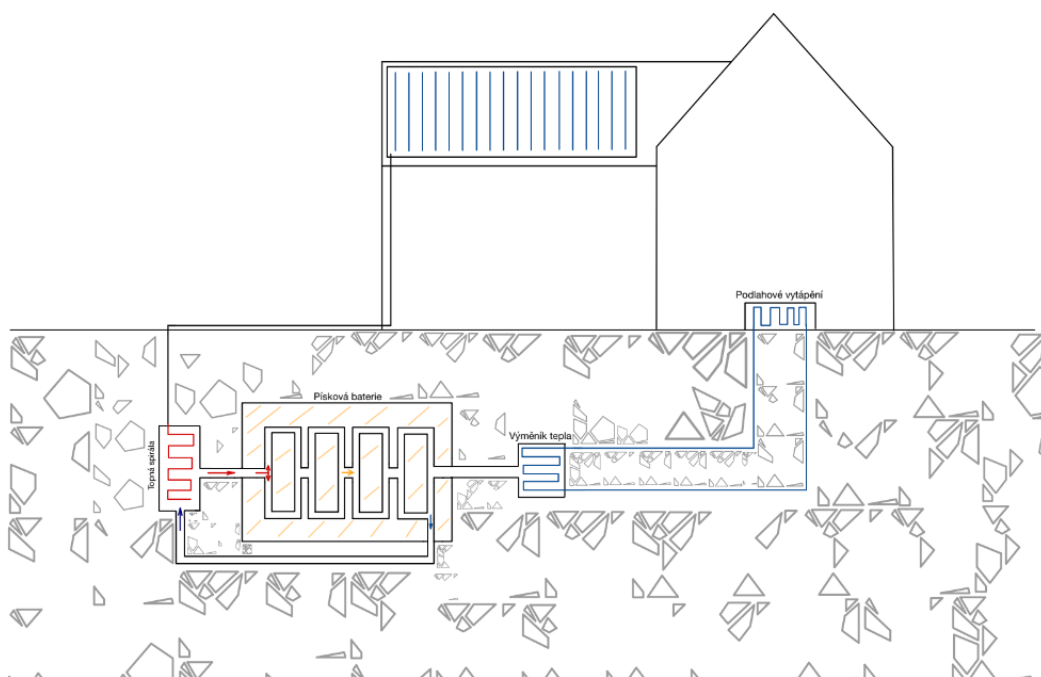
Vzhledem k výsledkům výpočtu tepelné emisivity palivového článku, nejsme schopni vytápění objektu zprostředkovat pouze pomocí FC. Potřebná energie pro vytopení je v našem případě 262 kWh/m²rok. Pomocí palivového článku jsme denně schopni vyrobit, dle zimní denní spotřeby, kolem 6 kWh. V průměru tedy 0,06 kWh/m²rok. To je pro naši aplikaci, z hlediska vytápění, naprosto nevyužitelné množství energie. Proto jsme se rozhodli, že jediná aplikace tepelné energie z palivového článku je pro ohřev teplé vody do domácnosti - bojler o obsahu 150 litrů. Vstupní teplotu do bojleru uvažujeme 25 °C, výstupní teplotu 65 °C. Účinnost výměníku tepla uvažujeme 0.85 kvůli delším přírodním trubkám. Nutná energie pro

ohřev vody v tomto bojleru je 8,1 kWh.[33] Pro vytápění jsme tedy nuceni použít alternativní zdroj tepelné energie.

Písková baterie

Písková baterie je alternativní způsob uložení tepelné energie pomocí sezonního ohřevu nádrže naplněné pískem. Princip tohoto systému je výroba tepelné energie pomocí přebytečné energie z OZE³, která je prouděním vzduchu předána zásobníku písku, ze kterého je následně v potřebnou dobu jímána pro ohřev vody podlahového vytápění.[34] Pískovou baterii jsme zvolili z důvodu nevelkých záložních zásob elektrické energie vytvořené palivovým článkem. Rozhodli jsme se využít střešní plochu technické budovy pro instalaci FVP. Tedy dle globalatlastinfo,[19], pro naší výměru použitelné plochy 55 m², jsme schopni ročně vyrobit přibližně 8 MWh tepelné energie. Takto získanou tepelnou elektrickou energii bychom přenesli do podzemního pískového úložiště - pískové baterie, ze které bychom pak jímali tepelnou energii pomocí výměníku vzduch voda a vytápěli tím náš rodinný dům. Dle finských výrobců jsme schopni v pískové baterii uchovávat tepelnou energii až několik měsíců.[35] Při naší stávající potřebě tepla 262 kWh/m² rok a výměře 106,25 m², potřebujeme 28 MWh tepelné energie na celé otopné období. Museli bychom omezit pohyb obyvatel v zimním období na menší část obytné plochy nebo dokonaleji zateplit budovu tak, aby se roční tepelná spotřeba vešla do 8 MWh, tedy do 76 kWh/m² rok. To by představovalo baterii o objemu 100 m³. Pokud by tak nebylo možné, je nutné připojit další doplňkový zdroj tepla. Například kotel na dřevěné pelety.

Diagram pískové baterie je následující:



Obrázek 3.3: Princip fungování pískové baterie

³Obnovitelný zdroj energie (*Renewable energy source*)

Kapitola 4

Technicko-Ekonomické zhodnocení proveditelnosti

4.1 Technické zhodnocení proveditelnosti

Technické zhodnocení provádíme z hlediska provozu systému. Zohledníme, zda-li má smysl elektrická instalace celého projektu - schopnost dodávky elektrické energie po delší dobu, náročnost instalace či normování použitých technologií. Z hlediska vytápění zohledníme funkčnost a dostatečnost systému.

Co se týče dodání energie do elektrických rozvodů, tak dle našich teoretických výpočtů a opatření typu připojení vyrovnávacího akumulátoru pro dosažení tvrdšího zdroje elektrické energie, jsme došli toho názoru, že provoz takto koncipovaného projektu je možný. Hodnotíme tak i z hlediska zásob vodíku. Jsme totiž schopni dosáhnout na dlouhodobý chod domácnosti bez přísunu solární energie resp. nového vodíku. Za rok jsme totiž schopni vyrobit přibližně 327 kg vodíku, úložiště koncipujeme 2500 litrů vodního objemu, tj. 93,75 kg vodíku při 350 bar. Uvažujeme, že jsme sezóně schopni naplnit kapacitu úložiště tj. 93,75 kg vodíku a uskladnit na období bez přísunu solární energie tj. říjen, listopad, prosinec, leden, únor. Dle našich výpočtů jsme schopni s vodíkem vystačit maximálně na 185 dní. Z hlediska normování všech použitých technologií jsme schopni vše zajistit dle norem ČSN popř. norem evropských. Z hlediska instalace se jedná o běžné připojení komponent.

Z hlediska tepelného zajištění naší budovy, by při použití pískové baterie bylo možno, při stávajícím stavu budovy, budovu vytápět. Musel by však systém pískové baterie být silně nad-dimenzován, neboť objem písku $350 m^3$ je z důvodu prostorového omezení pozemku neproveditelný. Zároveň takové množství energie nejsme schopni vyrobit. Muselo by se přistoupit k tepelnému zateplení střechy a stěn celé budovy - střecha v ideálním případě 240 mm mezi a pod krokvy, stěny 100 mm izolace (součinitel tepelné vodivosti $0,04 W/m \cdot K$), popř. výměna oken. Roční potřeba energie pro vytápění by pak klesla z $262 kW/m^2$ rok na přibližně $76 kW/m^2$ rok. To by znamenalo, že bychom potřebovali v průměru 8 MWh tepelné energie na celé otopné období. Tedy pískovou baterii o objemu $100 m^3$. Pokud bychom systémem obohatili navíc o částečnou rekuperaci tepla, byli bychom schopni energetické náklady na vytápění dále snížit a snížit tak rozměrové náklady na pískovou baterii.

4.1.1 Dostupnost využitých technologií

Dostupnost využitých technologií bude v našem koncipovaném systému jednou z největších obtíží. Co se týče již rozšířených technologií jako FVE, střídače, technologie úpravy vody atd., nejsou s dostupností problémy. U zařízení jako je elektrolyzér nebo stack palivových článků, je u výrobců jakási čekací doba, kdy je produkt vyroben a naceněn na objednání. Volně dostupné ceny jsou tedy spíše orientační. V České republice jsme v rámci vypracování této bakalářské práce neobjevili výrobce, nicméně v evropské unii jsou dodavatelé jako DACPOL či EH Group engineering.

4.1.2 Obtížnost oprav

Z hlediska obtížnost oprav se jedná o podobný případ jako u dostupnosti komponent. FVE je v dnešní době snadno dostupnou technologií, tedy běžný elektrikář je schopen jakýkoliv problém systému jednoduše opravit. Vodíkové technologie jsou v tomto ohledu složitější, neboť je pro jejich spravování nutný odborný technik, pravděpodobně od dodavatele technologie. To přináší problémy z hlediska dodání opravy, či nového kusu. Může se jednat řádově o několik dní, týdnů či měsíců.

4.2 Ekonomické zhodnocení

Ekonomické zhodnocení koncipujeme z hlediska úvodní investice, doby návratnosti při stávajících cenách elektrické a tepelné dodávky. Zároveň zhodnotíme vnitřní výnosové procento a nakonec provedeme citlivostní analýzu.

4.2.1 Úvodní investice

Úvodní investici odhadujeme dle průměrných cen komponent, které využíváme v našem systému. Jedná se pouze o orientační ceny. Některé ceny mohou být zavádějící, neboť dostupnost cen je z hlediska technologií zpracování vodíku uvedena pouze na poptávku. Solární panely 155 m^2 je hlavní část zisku energie pro uložení do vodíku. Panely 55 m^2 jsou přídatné pro pískovou baterii.

| Komponenty | Přibližná cena |
|--------------------------------------|----------------|
| Stack palivových článků 10 kW | 30 000[36] |
| Solární panely 155 m^2 | 600 000 |
| DC/DC měnič | 10 000 |
| Hybridní střídač | 60 000 |
| Akumulátor 5 kWh | 60 000 |
| Úložiště vodíku | 500 000 |
| Podlahové vytápění | 135 000 |
| PEM elektrolyzér | 400 000 |
| Oběhová čerpadla | 12 000 |
| Kompresory | 100 000 |
| Výměníky tepla | 30 000 |
| Zateplení střechy | 70 000 |
| Fotovoltaické panely 40 m^2 | 200 000 |
| Písková baterie | 4 000 000 |
| Celková investice | 6 207 000 |

Tabulka 4.1: Odhad počáteční investice

Z tabulky pozorujeme, že pořizovací cena vytápěcího systému zahrnuje větší část naší investice. Proto by z hlediska počáteční investice bylo výhodnější budovu dokonale zateplit, a vytvořit tak tepelně nenáročnou budovu. U které by bylo možné vytápění zajistit pomocí tepelného čerpadla, či jinými alternativními způsoby.

4.2.2 Doba návratnosti

Dobu návratnosti počítáme z průměrné ceny za 1 kWh všech českých distributorů.[37]

| E.ON | PRE | ČEZ |
|------|------|------|
| 8,42 | 8,27 | 8,74 |

Tabulka 4.2: Průměrná cena 1 kWh v Kč Českých distributorů

Při průměrném denním odběru 4,896 kWh je průměrný roční odběr 1,787 MWh, při průměrné ceně 8,47 Kč/kWh je průměrná roční návratnost 15136 Kč. Doba návratnosti by u takto nízko spotřebné budovy byla.

$$DN = \frac{IN}{Z} = \frac{7007000}{15136} = 463let$$

Kde DN je doba návratnosti, IN je počáteční investice a Z je roční výdělek. Pokud bychom místo pískové baterie uvažovali kvalitní zateplení s jiným tepelným zdrojem - investice do 1 milionu Kč, pak by doba návratnosti byla [38]

$$DN = \frac{IN}{Z} = \frac{3000000}{15136} = 198let$$

To je stále delší doba návratnosti než by, pro takovýto malý systém bylo vhodné. Pokud bychom totiž připočítali náklady na údržbu a výměnu použitých komponent, došli bychom toho výsledku, že by doba návratnosti u takto nízko spotřebové budovy nebyla dosažitelná.

Kdybychom námi koncipovanou spotřebu domu naprosto vyloučili a počítali s průměrnou spotřebou domu dle firmy ČEZ - 3MWh ročně[39] tedy čistý peněžní zisk 25410 Kč ročně. Došlo by k splacení počáteční investice za 118 let. Považujeme za vhodné, aby takovýto projekt byl sám sebou zaplacen v rámci jednoho života člověka (max 60 let), neboť předpokládaný vývoj technologií může způsobit rychlé zastarání použitých komponent a znehodnotit tak celý koncipovaný projekt. Toho bychom byli schopni dosáhnout pouze tehdy, kdy by spotřeba domácnosti byla alespoň 5,9 MWh ročně. To by znamenalo průměrnou denní spotřebu 16,15 kWh, tedy ohřívat vodu čistě elektricky a použít neúsporné spotřebiče. Takové množství spotřeby elektrické energie, ale není prakticky možné, aby náš systém dodával celoročně. Z hlediska doby maximálního soběstačného provozu bez solární energie by to znamenalo místo 180 dní 68 dní. Zároveň bychom při takovéto spotřebě nebyli schopni sezóně naplnit plně kapacitu vodíkového úložiště. Při maximálním výkonu každou hodinu každý den v měsíci červnu, kdy výkon FVE je maximální z celého roku, bychom byli schopni vyrobit do zásoby 20 dní elektrického fungování systému. Vzhledem k tomu, že tento odhad byl pro maximální výkony FVE, docházíme k výsledku, že při takto velké spotřebě by energie naakumulovaná navíc vyšla tak akorát na pokrytí dní, kdy není solární energie k výrobě k dispozici. Znamená to tedy, že když bychom snížili dobu návratnosti, tak nejsme schopni systém provozovat celoročně a investice se vůbec nevyplatí. Z ekonomického hlediska pak tedy takto koncipovaný projekt nedává smysl.

4.2.3 Vnitřní výnosové procento

Pro zajímavost můžeme nahlédnout na náš projekt z pohledu vnitřního výnosového procenta IRR¹ (internal rate of return). Jedná se o metodu ekonomické analýzy, jejíž výsledek je hodnota relativního výnosu (rentability), který je k dispozici v rámci životnosti systému.[40] Z hlediska životnosti budou nejnáročnější komponenty využívající PEM membránu, tedy palivový článek a elektrolyzér. U PEM elektrolyzérů se udává maximální životnost 20 let. U palivových článků je tomu stejně tak. Uvažujeme tedy životní cyklus celého systému 20 let. Poté je nutná výměna těchto komponent. Koncipujeme roční zisk při průměrné roční spotřebě 3 MWh – 25410 Kč.

Vztah, který využíváme k výpočtu tohoto parametru je následující:[40]

$$0 = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1 + IRR)^t} \quad (4.1)$$

¹Vnitřní výnosové procento (*internal rate of return*)

Kde CF_t je peněžní tok v jednotlivém roce, IRR je vnitřní výnosové procento, n je doba životnosti projektu v letech. Pro výpočet tohoto parametru jsme použili funkci Microsoft excel, která nám zajistí výpočet uvedený výše. IRR při době životnosti projektu 20 let je $IRR = -12\%$. Uvádí se, že investice se vyplatí pokud je IRR větší než parametr WACC Průměrné náklady kapitálu. Ten se udává jako:[41]

$$WACC = r_d(1 - t) \cdot \frac{D}{C} + r_e \cdot \frac{E}{C} \quad (4.2)$$

kde r_d jsou náklady na cizí kapitál, t je sazba daně z příjmu právnických osob, D jsou dluhy, C je dlouhodobě investovaný kapitál r_e je očekávaná výnosnost vlastního kapitálu a E je vlastní kapitál.

Pomocí internetová kalkulačky www.calkoo.com [42] jsme získali hodnotu parametru $WACC^2 = 0,84\%$. To dle předchozího kritéria $IRR > WACC$ znamená, že se investice, z hlediska životnosti projektu, nevyplatí.

Z hlediska těchto dvou výstupů jsme se rozhodli neprovádět citlivostní analýzu pro tento projekt, neboť koncipovaný projekt nedává z ekonomického hlediska smysl.

4.3 Celkové zhodnocení

| Energetický potenciál - elektrická energie | | |
|--|---------|---------|
| FVE 155 m ² | 25,031 | MWh/rok |
| Elektrolyzér | 327 | kg/rok |
| Sezónní nadbytek | 93,75 | kg/rok |
| Palivový článek | 1113,75 | kWh/rok |
| Spotřeba | 6 | kWh/den |
| Maximální doba provozu | 185 | dní |

Tabulka 4.3: Tabulka shrnutí energetického potenciálu systému pro výrobu elektrické energie

Měsíce pro naplnění kapacity vodíkového úložiště - Sezónní nadbytek, uvažujeme: duben, květen, červen, červenec, srpen, září. Denní spotřeba elektrické energie je uvažována vyšší v ohledu na zimní období v němž bude postupně čerpáno z vodíkového úložiště. V tabulce č. 4.3 si můžeme všimnou shrnutí energetického potenciálu systému výroby elektrické energie, podle kterého jsme schopni bez přísunu energie pro výrobu vodíku v období nejmenšího přísunu solární energie - říjen, listopad, prosinec, leden, únor - (151 dní), při dané spotřebě, vystačit až 185 dní.

²Průměrné náklady kapitálu (*Weighted average cost of capital*)

| Energetický potenciál - tepelná energie | | |
|---|-------|------------------------|
| FVE 55 m ² | 8,9 | MWh/rok |
| Písková baterie | 8,01 | MWh/rok |
| Potřebná tepelná energie | 76 | kWh/m ² rok |
| Celková tepelná spotřeba | 8,075 | MWh/rok |
| Otopné období | 232 | dní |
| Maximální doba provozu | 230 | dní |

Tabulka 4.4: Tabulka shrnutí energetického potenciálu systému pro výrobu tepelné energie

Získaná elektrická energie z přídatné FVE je přeměněna na energii tepelnou, s uvažovanou účinností přeměny - 0,9. Tepelná energie je následně uložena v pískové baterii - 8,01 MWh/rok. Pokud uvažujeme celosezónní spotřebu energie pro vytopení celé obytné plochy 8,075 kWh/rok, systémovou účinnost 0,9 a občasné přidání tepelné energie z FVE do pískové baterie, jsme schopni takto navržený systém s danou tepelnou spotřebou provozovat po dobu přibližně 230 dní. To odpovídá délce otopného období viz. tabulka č.4.4.

Z technického hlediska je námi koncipovaný projekt realizovatelný, nicméně z ekonomického hlediska smysl nedává. Pokud bychom totiž uvažovali nízkou energetickou náročnost celého projektu resp. dlouhodobý chod domácnosti bez přísunu nového vodíku. Pak je ekonomická návratnost projektu v rámci stovek let. Při vyšších odběrech, čili pohybu doby návratnosti v rámci několika desítek let, však narážíme na nedostatečnou akumulaci elektrické energie resp. účinnosti systému a nejsme schopni projekt provozovat celoročně. Největším problémem pro náš projekt je elektrická účinnost palivového článku. Hodnota elektrické účinnosti FC 0,36 a výrobci udávaná maximální hodnota 0,5[29], způsobuje, že nejsme schopni vyrobit dostatek elektrické energie pro udržení tohoto systému.

To nás přivádí k výsledku této práce. Postupnou analýzou složitosti systému, ekonomické náročnosti atd. jsme došli toho názoru, že při konverzi starých budov na budovy energeticky soběstačné není použití vodíkových technologií vhodný způsob. Vodíkové technologie jsou momentálně příliš nákladné, nedostupné a nedostatečně účinné. Mnohem logičtější by pro energetickou soběstačnost budov bylo dokonalé zateplení. Tedy vytvoření pasivního domu, který má maximální roční potřebu energie 15 kWh/m². Pro ekologické vytápění by bylo možno využít methanový generátor ze zbytků jídla, který by pak byl spalován pomocí kondenzačního kotle. Dobré by také bylo využití alespoň částečné rekuperace tepla a také mít možnost přechodu na záložní zdroj vytápění např. kotel na dřevěné pelety. Zisk elektrické energie by byl stále uvažován z FVE, nicméně uložení by bylo do akumulační jednotky vyšších kapacit.

Z hlediska vývinu způsobu konverze budov na budovy částečně nebo plně energeticky soběstačné, můžeme z hlediska dostupných technologií říci, že se jedná o korektní způsob. Z hlediska oprav se jedná o jednoduchý systém. Není třeba vysoké expertízy elektrotechnika a pořizovací cena tohoto systému není příliš vysoká. Čili i u nízké elektrické spotřeby jsme schopni dosáhnout kratší doby návratnosti a zároveň vyššího IRR.

Závěr

Teoretická analýza všech využitých technologií přinesla do návrhu celého systému povědomí o účinnosti všech dílčích komponent. Prokázalo se, že provoz PEM elektrolyzéro závisí zejména na použití elektrolytické membrány. Dosahuje hodnot účinnosti kolem 0,7. To je z hlediska uložení energie ve formě vodíku výhodná hodnota. Oproti tomu uvedený výpočet účinnosti PEM palivového článku ukázal, že účinnost při zvolených jmenovitých hodnotách dosahuje nižších hodnot (0,36) než-li uvádí výrobce - až 0,5. To vnáší do celého systému nedostatek, který následně ovlivnil celý koncept soběstačnosti budovy.

Energetická bilance projektu prokázala, že při stávajícím stavu budovy není možno dostatečně zásobovat objekt tepelnou energií, neboť nedostatečnost zateplení znamená vysoké množství potřebné tepelné energie. Proto byl předložen návrh zateplení budovy, který by snížil celkovou tepelnou náročnost budovy. Co se týče elektrické náročnosti bylo zjištěno, že navrhovaná domácnost by měla nižší spotřebu elektrické energie než-li průměrná domácnost v ČR. Byl odhadnut pravděpodobný profil odběrových diagramů pro otopná a neotopná období.

Analýza dat výkonu fotovoltaické elektrárny za roky 2015 - 2020 nám umožnila přesněji odhadnout množství generované energie v jednotlivých měsících. To se prokázalo jako důležitý aspekt celého projektu, neboť takto získaná data umožnila odhadnout množství vyrobeného vodíku. Analýzou přebytku vodíku bylo zjištěno, že při dané spotřebě v neotopném období je reálné vyrobit dostatečné množství vodíku pro naplnění kapacity vodíkového úložiště. Po odhadu elektrického výkonu a spotřeby vodíku palivového článku se tento způsob řešení jeví jako dostatečný pro zásobení domu elektrickou energií po dobu energetického deficitu. Vytápění budovy pomocí tepla generovaným palivovým článkem bylo vyhodnoceno jako nedostatečné. Byl proto zvolen doplňkový způsob vytápění budovy - písková baterie. Po korekci zateplení budovy byl námi uvažovaný systém vytápění shledán proveditelným, neboť by byl schopen vytopit celou obytnou plochu po dobu otopného období.

Z technického hlediska byl navrhovaný projekt vyhodnocen jako proveditelný. Jediný identifikovatelný problém je dostupnost komponent a jejich opravitelnost. Je totiž nutná vysoká míra odbornosti pro opravu. Dostupnost pro veřejný sektor je momentálně nedostatečná. Z ekonomického hlediska byl systém shledán nevýhodným, neboť nízká elektrická spotřeba a i výsledná nízká tepelná spotřeba způsobí malé peněžní zisky v porovnání s vysokou pořizovací cenou všech komponent. Tedy při výpočtu ekonomických parametrů jako je vnitřní výnosové procento bylo zjištěno, že není výhodné takto navržený systém provozovat.

Po kompletaci systému jsme dospěli toho názoru, že nejlepším řešením energetické soběstačnosti, z ekonomického i technického hlediska, je použití fotovoltaické elektrárny na výrobu elektrické energie, která je ukládána do akumulátoru. Dalším aspektem ideálního způsobu řešení soběstačnosti je výroba a uskladnění tepelné

energie pro vytápění a ohřev vody alternativním způsobem - použití nízko objemového bioplynového systému, či použití pískové baterie.

Z hlediska rozšíření této práce by bylo možné porovnání provozu systému s palivovým článkem se systémem založeným na nabíjení akumulární jednotky pomocí nízko-výkonové vodíkové mikroturbíny do 30 kW. Ta totiž dosahuje vyšších účinností než palivový článek a takto řešený systém by se mohl prokázat jako výhodnější.

Bibliografie

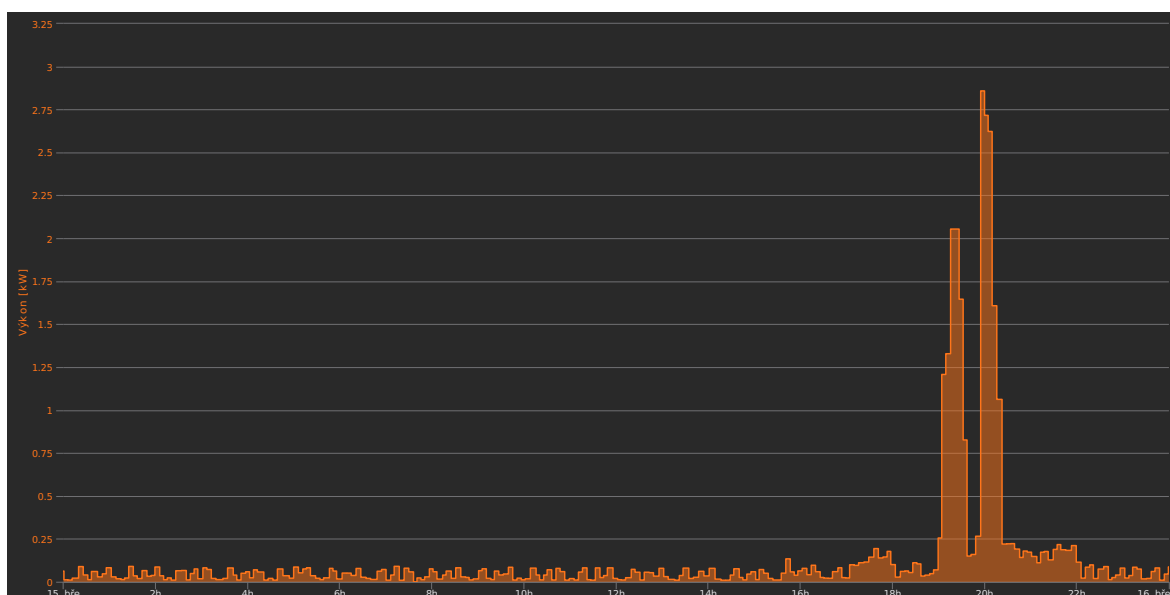
1. KOTAS, Ing. Jindřich. *Základní funkce a princip reverzní osmózy*. VŠCHT, 2016. Dostupné také z: <https://voda.tzb-info.cz/vlastnosti-a-zdroje-vody/14589-zakladni-funkce-a-princip-reverzni-osmozy-ro>.
2. KAMEŠ, Josef. *Vodík alternativní palivo*. 3. vyd. Nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 0978-80-254-1686-0.
3. GANDIA LUIS M. Gurutze ARZAMENDI, Pedro M. DEIGUEZ. *Renewable Hydrogen Technologies: Production, Purification, Storage, Applications and Safety*. Elsevier, 2013. ISBN 9780444563521.
4. TONGZHOU WANG XUEJIE Cau, LIFANG Jiao. *PEM water electrolysis for hydrogen production: fundamentals, advances, and prospects*. Wang et al. Carbon Neutrality, 2022. Dostupné také z: <https://d-nb.info/1264104553/34>.
5. SCHEEPERS, Fabian. *Improving the Efficiency of PEM Electrolyzers through Membrane Specific Pressure Optimization*. 2020.
6. HANCKE REGINALD Thomas HOLM, Oystein Ullberg. *The case for high-pressure PEM water electrolysis*. Elsevier, 2007. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890422004381%7D>.
7. ČSN 07 8304 - *Tlakové nádoby na plyny - provozní pravidla*. Úřad pro technickou normalizaci, 2022. Č. Třídící znak 078304.
8. ČSN EN 13445-1 *Netopené tlakové nádoby*. Úřad pro technickou normalizaci, 2022. Č. Třídící znak 695245.
9. LENNIE, KLEBANOFF. *Hydrogen Storage Technology*. Taylor & Francis, 2016. ISBN 9780128148549.
10. BARBIR, Frano. *PEM Fuel Cells Theory and Practice*. Elsevier Inc., 2005. ISBN 978-0-12-078142-3.
11. NEWS, Energy live. *Hydrogen leaks could mean it's not so green after all*. 2022. Dostupné také z: <https://www.energylivenews.com/2022/08/05/hydrogen-leaks-could-mean-its-not-so-green-after-all/>.
12. PORŠ, Ing. Zdeněk. *Palivové články*. Nakladatelství ČEZ, 2002. Dostupné také z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/palivove-clanky.pdf>.
13. ČSN EN ISO 8044 *Koroze kovů a slitin - základní termíny a definice*. Úřad pro technickou normalizaci, 2016. Č. Třídící znak 038001.

14. HUANG XINHING, Zhihao Zhang. *Fuel Cell Technology for Distributed Generation: An Overview*. The University of Western Ontario, 2006. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/224687448_Fuel_Cell_Technology_for_Distributed_Generation_An_Overview.
15. *Centrifugal compressor technology explained*. Atlas Copco, 2023. Dostupné také z: <https://www.atlascopco.com/en-uk/compressors/products/air-compressor/centrifugal-compressor>.
16. *Letecký snímek objektu*. mapy.cz, 2023. Dostupné také z: <https://en.mapy.cz/letecka?x=14.2293875&y=49.1511546&z=18>.
17. S.R.O., BSH domácí spotřebiče. *Hodnoty spotřeb jednotlivých spotřebičů*. 2023. Dostupné také z: <https://www.siemens-home.bsh-group.com/cz/vypis-produktu/>.
18. *Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2012/27/EU o energetické účinnosti*. Evropský parlament, Rada Evropské unie, 0201. Č. Číslo procedury 2011/0172/COD.
19. *Odhad výroby fotovoltaické elektrárny*. Global Solar atlas, [b.r.]. Dostupné také z: <https://globalsolaratlas.info/detail?c=49.153275,14.23063,19&s=49.153274,14.230629&m=site&pv=small,130,45,25>.
20. S.R.O, Topinfo. *Venkovní výpočtové teploty a otopná období dle lokalit*. 2023. Dostupné také z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/25-venkovni-vypoctove-teploty-a-otopna-obdobi-dle-lokalit>.
21. ČVUT, KAB Katedra TZB FSv. *DENOSTUPŇOVÁ METODA VÝPOČTU ROČNÍ POTŘEBY TEPLA*. 2021. Dostupné také z: <http://tzb.fsv.cvut.cz/files/denostunova-metoda-vypoctu-rocni-potreby-tepla.pdf>.
22. S.R.O, Topinfo. *Zjednodušený výpočet potřeby tepla na vytápění a tepelných ztrát obálkou budovy*. 2023. Dostupné také z: <https://stavba.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/128-on-line-kalkulacka-uspor-a-dotaci-zelena-usporam>.
23. *ČSN 73 0540-2 - Tepelná ochrana budov Část 2: Požadavky*. Úřad pro technickou normalizaci, 2011. Č. Třídící znak 730540.
24. *ČSN EN 15 665/Z1 - Větrání budov*. Úřad pro technickou normalizaci, 2009. Č. Třídící znak 127021.
25. OBCHODU, Ministerstvo průmyslu a. *Vyhláška č. 291/2001 Sb. - Vyhláška Ministerstva průmyslu a obchodu, kterou se stanoví podrobnosti účinnosti užití energie při spotřebě tepla v budovách*. 2002.
26. E.ON. *Jaké výhody má podlahové vytápění*. 2023. Dostupné také z: <https://www.eon.cz/radce/vytapani-a-vetrani/usporne-vytapani/jake-vyhody-ma-podlahove-vytapani/>.
27. ATELIÉR OTVOROVÝCH VÝPLNÍ, izolací a vybavení staveb. *Podlahové topení patří budoucnosti*. 2009. Dostupné také z: <https://www.tzb-info.cz/6002-podlahove-topeni-patri-budoucnosti>.
28. ČEZ, Skupina. *Energetický štítek budovy*. 2021. Dostupné také z: <https://www.cez.cz/cs/clanky/energeticky-stitek-budovy-k-cemu-slouzi-a-jak-ho-ziskat-154177>.

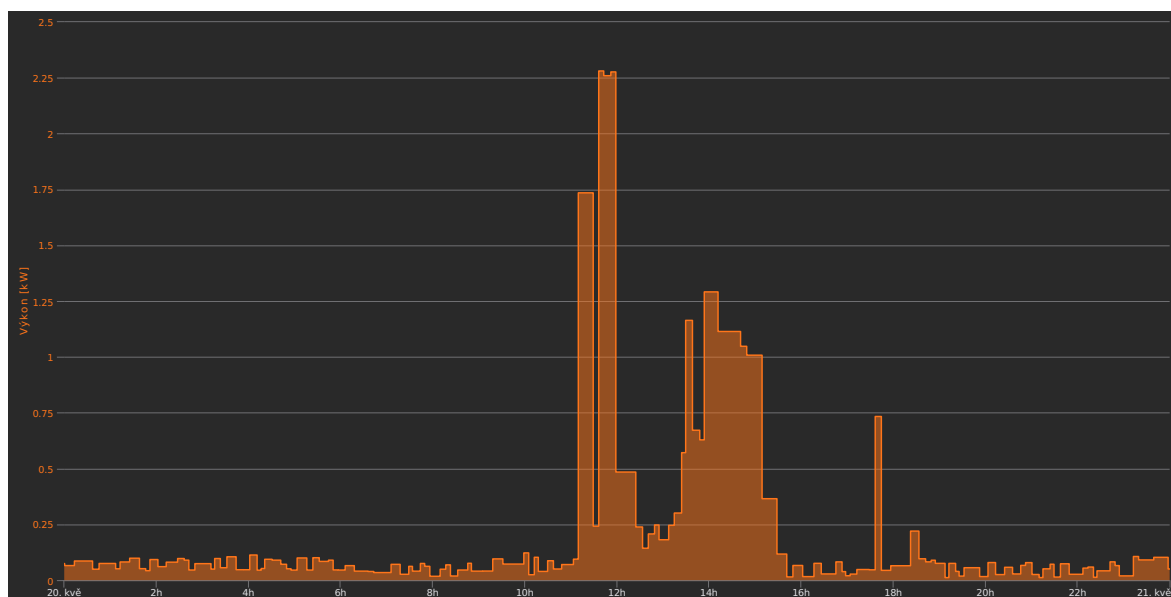
29. DEVINN. *Use of Hydrogen in Cars*. 2019. Dostupné také z: <https://en.devinn.cz/blog/vyuziti-vodik>.
30. *PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION*. 2022. Dostupné také z: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html.
31. AHDB. *Hydrogen electrolysis*. 2023. Dostupné také z: <https://ahdb.org.uk/knowledge-library/hydrogen-electrolysis>.
32. A.A. EBRAHIMZADEH I. KHAZAEI, A. FASIH FAR. *Numerical investigation of dimensions and arrangement of obstacle on the performance of PEM fuel cell*. Heliyon, 2028.
33. REINBERK, Ing. Zdeněk. *Výpočet doby ohřevu teplé vody*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/97-vypocet-doby-ohrevu-teple-vody>.
34. ENERGY, Polar Night. *Sand Battery*. 2022. Dostupné také z: <https://polarnightenergy.fi/sand-battery>.
35. BLUMELOVÁ, Kristina KADLAS. *Pískové baterie mají potenciál ekologického a velmi efektivního způsobu skladování energie*. Technický týdeník, 2022. Dostupné také z: <https://polarnightenergy.fi/sand-battery>.
36. INSTITUTE, Battelle Memorial. *Manufacturing Cost Analysis of PEM Fuel Cell Systems for 5- and 10-kW Backup Power Applications*. 2016. Dostupné také z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/articles/manufacturing-cost-analysis-pem-fuel-cell-systems-5-and-10-kw-backup-power>.
37. S.R.O, Topinfo. *Cena elektřiny 2023 - srovnání E.ON, PRE, ČEZ*. 2023. Dostupné také z: <https://www.tzb-info.cz/ceny-paliv-a-energi/14-ceny-elektriny>.
38. MALEČKOVÁ, Ing. Veronika. *METODA DOBY NÁVRATNOSTI INVESTICE*. Technický týdeník, 2022. Dostupné také z: <https://polarnightenergy.fi/sand-battery>.
39. ČEZ, Skupina. *Jaká je průměrná spotřeba elektřiny u rodinného domu?* 2022. Dostupné také z: <https://www.cez.cz/cs/clanky/elektrina/jaka-je-prumerna-spotreba-elektriny-u-rodinneho-domu-174046>.
40. MANAGEMENTMANIA.COM. *Vnitřní výnosové procento (IRR - Internal Rate of Return)*. ManagementMania's Series of Management ISSN 2327-3658, 2015.
41. MANAGEMENTMANIA.COM. *Průměrné náklady kapitálu (Weighted Average Cost of Capital - WACC)*. ManagementMania's Series of Management ISSN 2327-3658, 2016.
42. CALKOO. *Weighted Average Cost of Capital*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.calkoo.com/en/wacc-calculator>.

Přílohy

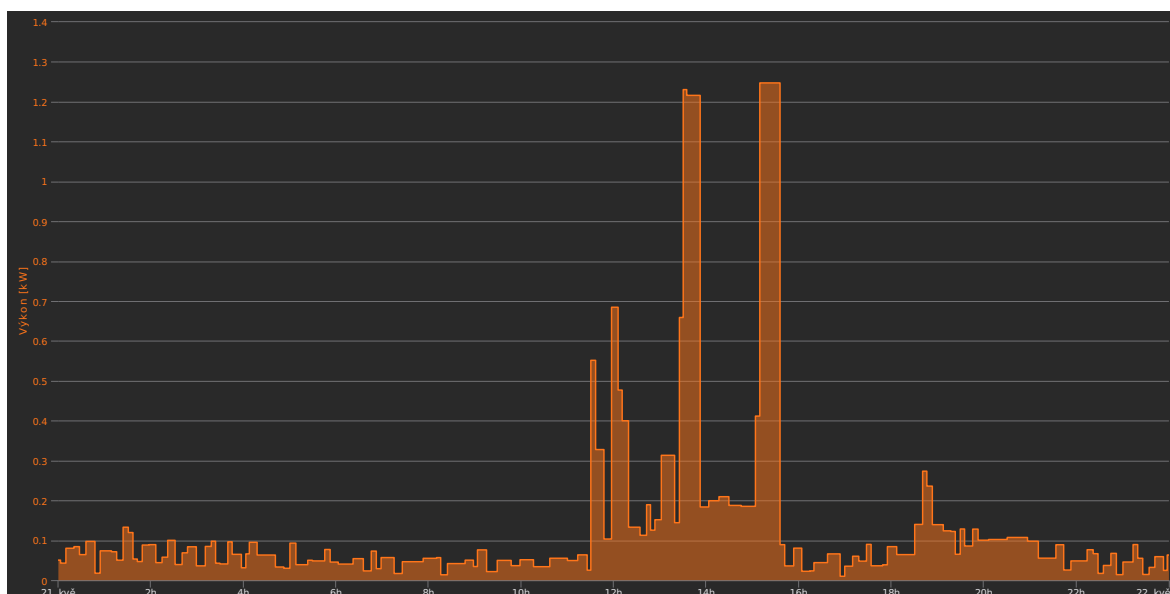
A Odběrový diagram bytu ze dne 15.3.2023



B Odběrový diagram bytu ze dne 20.5.2023



C Odběrový diagram bytu ze dne 21.5.2023



D Odběrový diagram bytu ze dne 22.5.2023

