
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA MĚŘENÍ



**PRODUKCE A VYUŽITÍ VODÍKU
V SOUBORU BUDOV**

**HYDROGEN PRODUCTION AND USE IN
THE CLUSTER OF BUILDINGS**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studijní program: Inteligentní budovy

Studijní obor: Inteligentní budovy

Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Matuška, Ph.D.

Bc. David Hanč

Praha 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hanč** Jméno: **David** Osobní číslo: **486532**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Inteligentní budovy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Produkce a využití vodíku v souboru budov

Název diplomové práce anglicky:

Hydrogen production and use in the cluster of buildings

Pokyny pro vypracování:

Proveďte rešerši možností využití vodíku jako akumulátoru energie. Analyzujte pro zadaný soubor budov možnosti produkce a využití vodíku. Stanovte energetickou bilanci potřeb výkonu a energie pro vytápění a přípravu teplé vody budov. Navrhněte možný instalovaný výkon fotovoltaických systémů v dané čtvrti a bilancujte jejich produkci elektrické energie. Výpočty provádějte v hodinovém časovém kroku. Proveďte analýzu vlivu návrhových parametrů vodíkového hospodářství na energetickou soběstačnost souboru budov (výkon elektrolyzéru, velikost akumulace vodíku, výkon palivového článku). Pro soubor budov uvažujte centrální zdroj tepla a tepelnou síť. Jako srovnávací variantu uvažujte kogenerační jednotku na zemní plyn s plynovým kotlem jako špičkovým zdrojem tepla.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Hydrogen Roadmap Europe – A Sustainable Pathway for the European Energy Transition, 2019, doi:10.2843/341510, dostupné z <http://fch.europa.eu>.
- [2] Staněk K.: Fotovoltaika pro budovy, Grada Publishing: Praha 2012.
- [3] Normy a vyhlášky ČR věnované energetice.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Tomáš Matuška, Ph.D. ústav techniky prostředí FS

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **09.02.2024** Termín odevzdání diplomové práce: **24.05.2024**

Platnost zadání diplomové práce:
do konce letního semestru 2024/2025

doc. Ing. Tomáš Matuška, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové 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 24.5.2024

.....

Bc. David Hanč

Poděkování

Rád bych poděkoval za vedení a podporu, kterou mi poskytl vedoucí mé diplomové práce, doc. Ing. Tomáš Matuška, Ph.D. Jeho odborné znalosti a postřehy byly neocenitelné během celého procesu výzkumu a psaní práce. Jsem také vděčný svým rodičům za jejich soustavnou podporu a povzbuzení, které mi pomohly dokončit tuto diplomovou práci.

Abstrakt

Tato práce se zabývá využitím vodíku v souboru budov a zaměřuje se na ekonomickou náročnost výroby vodíku v lokalitě. Je vypočtena hodinová spotřeba elektrické energie, tepla a výroba elektrické energie z fotovoltaické elektrárny v souboru budov. Přebytky z fotovoltaické elektrárny jsou analyzovány pro využití výroby vodíku pomocí elektrolýzy. Řešení je porovnáno s řešením využívající kogenerační jednotku.

Klíčová slova

Výroba vodíku, zelený vodík, ukládání energie do vodíku, fotovoltaická elektrárna, náklady na výrobu vodíku, integrace obnovitelných zdrojů energie, hodinové energetické údaje, integrace vodíku a kogenerace.

Abstract

This paper examines the use of hydrogen in a cluster of buildings and focuses on the economics of on-site hydrogen production. The hourly electricity and heat consumption and electricity production from a photovoltaic plant in a cluster of buildings is calculated. The surplus from the photovoltaic plant is analyzed for the use of hydrogen production by electrolysis. The solution is compared with a solution using a CHP unit.

Keywords

Hydrogen production, green hydrogen, hydrogen energy storage, photovoltaic power plant, cost of hydrogen production, renewable energy integration, hourly energy data, residential project.

Obsah

1. Úvod	11
2. Technologie využití vodíku	12
2.1. Rozdělení vodíku	12
2.2. Ekonomika vodíku	14
2.3. Produkce vodíku	15
2.4. Elektrolýzéry	17
2.4.1. Alkalický elektrolýzér	17
2.4.2. PEM Elektrolýzér	19
2.4.3. Elektrolýzér SOE	20
2.4.4. Elektrolýzér AEM	21
2.4.5. Porovnání typů elektrolýzérů	21
2.4.6. Cíle pro rok 2050 ve vývoji elektrolýzérů	22
2.5. Provozní parametry elektrolýzéro	23
2.5.1. Proudová hustota	23
2.5.2. Teplota	24
2.5.3. Účinnost	25
2.6. Spotřeba vodíku	27
2.6.1. Palivový článek AFC	27
2.6.2. Palivový článek PEMFC	28
2.6.3. Spalování vodíku v KGJ	29
3. Energetická bilance čtvrti	30
3.1. Popis budov	30
3.2. Klimatické podmínky	33
3.3. Potřeba tepla na vytápění	34

3.4.	Příprava teplé vody	40
3.5.	Bilance potřeby elektrické energie	43
3.6.	Bilance FV elektrárny	44
3.6.1.	Postup výpočtu.....	44
3.6.2.	Návrh plochy fotovoltaické elektrárny.....	46
4.	Vodíkové hospodářství	50
4.1.	Varianta zelený vodík	52
4.2.	Varianta šedý vodík	56
4.3.	Varianta SVR vodík.....	60
4.4.	Dimenzování systému	65
4.5.	Varianta s kogenerační jednotkou.....	68
4.6.	Shrnutí výsledků	70
5.	Závěr	73

Seznam zkratek

FVE	Fotovoltaická elektrárna
OZE	Obnovitelné zdroje energie
PpS	Podpůrná služba
SVR	Služby výkonové rovnováhy
aFRR	Automatic frequency restoration reserve (záloha pro regulaci výkonové rovnováhy s automatickou aktivací)
LCOE	Levelized Cost of Energy (Vyrovnané náklady na elektřinu)
SMR	Steam reforming (Parní reformace)
PEM	Proton exchange membrane (Protonová výměnná membrána)
SOE	Solid oxide electrolyzer (Elektrolyzér s pevnými oxidy)
AEM	Anion Exchange membrane (Aniontová výměnná membrána)
KGJ	Kogenerační jednotka
NZEB	Nearly zero energy building (Budova s téměř nulovou spotřebou energie)
PVGIS	Photovoltaic geographical information systém (Fotovoltaický geografický systém)
TDD	Typový diagram dodávky
NOCT	Nominal operational cell temperature (Nominální provozní teplota člunku)

Seznam symbolů a veličin

Označení	Název	Jednotka
$\dot{n}_{id H_2}$	Molární průtok plynného vodíku	$\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$
F	Faradayova konstanta	$\text{C}\cdot\text{mol}^{-1}$
I	Proudová hustota	$\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$
U	Součinitel prostupu tepla	$\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$
θ	Teplota	$^{\circ}\text{C}$
H_T	Tepelný tok prostupem obálky budovou	W/K
H_V	Měrný tepelný tok větráním	W/K
A	Plocha	m^2
\dot{V}_f	Větrací průtok	$\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$
\dot{V}_x	Průtok infiltrací	$\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$
Q_H	Potřeba tepla	kWh
Q_L	Ztráty tepla	kWh
Q_i	Vnitřní tepelné zisky	kWh
Q_s	Solární tepelné zisky	kWh
$Q_{W,\text{den}}$	Denní potřeba tepla na ohřev TV	kWh
$Q_{W,z,\text{den}}$	Denní ztráty tepla	kWh
g	Součinitel prostupu sluneční energie	-
ρ	Hustota	kg/m^3
c	Měrná tepelná kapacita	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

1. Úvod

Vodík je celosvětově hojně využíván v různých průmyslových odvětvích, zejména v chemickém průmyslu. S přechodem světa na udržitelné energetické systémy se vodík stále více zkoumá pro svůj potenciál v oblasti skladování energie a využití v nových odvětvích. Tato práce se zabývá využitím vodíku v souboru obytných budov v rámci rezidenčního projektu v Dolních Počernicích. Vhodnost projektu pro instalaci fotovoltaické elektrárny (FVE) na dostupné střešní plochy představuje příležitost pro integraci řešení obnovitelných zdrojů energie.

Jako první byly vypočteny hodinové údaje o spotřebě tepelné a elektrické energie pro soubor budov. Byla navržena fotovoltaická elektrárna a vypočtena její hodinová výroba elektřiny. Na základě údajů o výrobě z fotovoltaických panelů byl posouzen potenciál výroby, skladování a využití vodíku v palivových článcích pro zásobování budov elektřinou a teplem. Vodík vyrobený pouze z přebytků fotovoltaické elektrárny se považuje za zelený vodík, který se vyznačuje nulovými emisemi. Jeho výroba je ovšem silně závislá na produkci fotovoltaické energie.

V práci je kromě možnosti výroby vodíku pouze z přebytků fotovoltaické elektrárny dále analyzována varianta, kdy lze využít levné elektřiny na trhu, kterou je možné využít pro výrobu vodíku. Je také analyzována varianta, kdy je elektrolyzátor poskytován na podpůrné služby (PpS), což může zlepšit ekonomickou návratnost a také zvýšit výrobu vodíku oproti výrobě pouze z přebytků FVE. Vodík vyrobený druhou a třetí variantou už nelze označit za zelený, protože je vyráběn z elektřiny ze sítě, která nelze označit za obnovitelnou. Ovšem i tato výroba nese pozitivní vliv pro bilancování elektrizační soustavy a ukládání energie na později, kdy je nedostatek energie. Řešené varianty jsou porovnány s variantou s kogenerační jednotkou. Každá varianta je také ekonomicky zhodnocena pomocí LCOE analýzy, která dává údaj o tom, kolik bude stát vyrobit energii z vodíku v průběhu celé životnosti systému. Tyto údaje mohou sloužit při rozhodování o investici do vodíkového projektu.

2. Technologie využití vodíku

Vodík je nejjednodušší a nejrozšířenější prvek ve vesmíru, který objevil Henry Cavendish v roce 1766. Je to plyn bez barvy, zápachu a chuti, který je vysoce hořlavý. Vodík je asi 14,5krát lehčí než vzduch a je obsažen v zemním plynu a všech organických sloučeninách. Přestože je vodík ve vesmíru hojně zastoupen a tvoří přibližně 90 % všech atomů, na Zemi se v čisté formě vyskytuje jen zřídka. Místo toho se obvykle vyskytuje v kombinaci s dalšími prvky v různých sloučeninách, jako je voda (H₂O) a uhlovodíky. [1]

Tabulka 2.1 Základní informace o vodíku [1]

Chemická značka:	H
Vzhled:	Bezbarvý plyn
Ionizační energie:	13,598 eV
Hustota:	0,0899 kg/m ³
Energetický obsah (výhřevnost):	33,33 kWh/kg
Teplota tání:	14,03 K
Teplota varu:	20,27 K

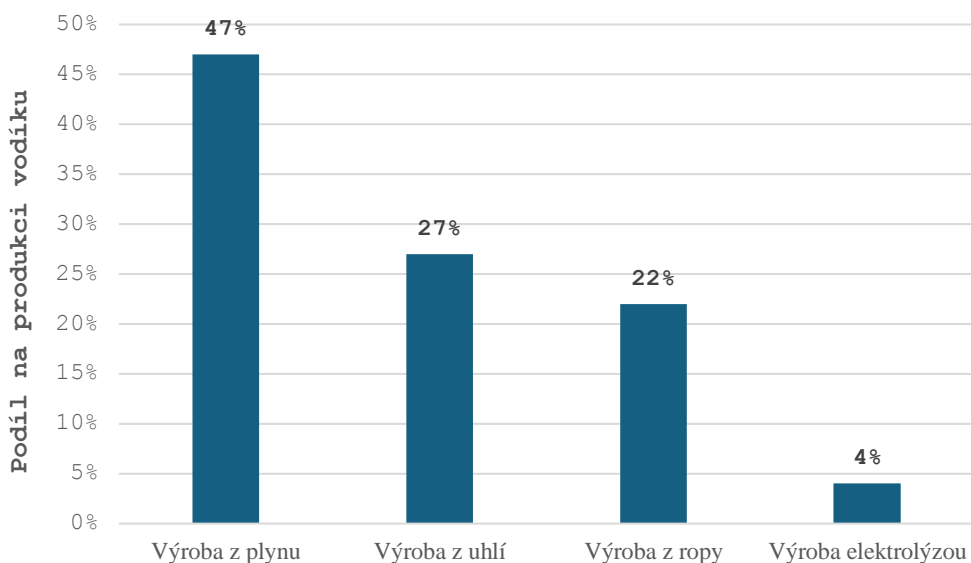
2.1. Rozdělení vodíku

Jedním z cílů propagátorů vodíkového hospodářství je, aby byl vodík vyráběn výhradně z obnovitelných zdrojů, jako jsou větrná, solární a vodní energie. Většinou se uvažuje o využití obnovitelné elektřiny jako zdroje pro výrobu vodíku procesem zvaným elektrolýza. [5]

Vodík lze rozdělit podle způsobu výroby, především podle uhlíkové stopy a zdrojů energie, do několika kategorií. Tato kategorizace vede k pojmům "šedý", "modrý", "zelený" a méně často "žlutý", "tyrkysový" a "růžový" vodík, přičemž každý z nich představuje jiný dopad na životní prostředí a jiný zdroj elektřiny pro výrobu. Každá kategorie odráží pokračující snahu o vyvážení ekonomických, environmentálních a technologických faktorů výroby vodíku. [2],[5]

- **Šedý vodík:** Jedná se o nejběžnější typ, který se vyrábí především parní reformací metanu (dále SMR, z angl. Steam reforming of methane) ze zemního plynu. Při tomto procesu se do atmosféry uvolňuje značné množství CO₂, takže je nejméně šetrný k životnímu prostředí. Šedý vodík dnes představuje většinu výroby vodíku díky své nákladové efektivitě, a to i přes své ekologické nevýhody. [5],[6]

- **Hnědý vodík:** Hnědým vodíkem se rozumí vodík vyráběný zplyňováním hnědého uhlí. Při zplyňování se hnědé uhlí mění na plyn reakcí s kyslíkem a párou za vysokých teplot. Tento syntézní plyn, směs vodíku, oxidu uhelnatého, oxidu uhličitého a dalších složek, se pak dále zpracovává za účelem oddělení a vyčištění vodíku. Tento způsob výroby vodíku je považován za jeden z nejméně šetrných k životnímu prostředí kvůli vysokým emisím CO₂ spojeným jak se zplyňováním hnědého uhlí, tak s následným zpracováním syntézního plynu za účelem získání vodíku. [5],[6]
- **Modrý vodík:** Tento typ vodíku se vyrábí podobně jako šedý vodík, také zahrnuje SMR, s výjimkou toho, že zahrnuje technologie zachycování a ukládání uhlíku (CCS z angl. Carbon capture and storage) k zachycení emisí CO₂ vznikajících při tomto procesu. Tato metoda výrazně snižuje uhlíkovou stopu ve srovnání s šedým vodíkem, i když ji zcela neodstraňuje. [5],[6]
- **Zelený vodík:** Tento vodík se vyrábí elektrolýzou vody s využitím elektřiny z obnovitelných zdrojů energie. Zelený vodík je považován za nejšetrnější k životnímu prostředí, protože pokud je použita elektřina zcela z obnovitelných zdrojů, vede k nulovým emisím CO₂. Vodík vyrobený pouze ze solárního zdroje je označován jako žlutý vodík a je to podkategorie zeleného vodíku. [5],[6]
- **Tyrkysový vodík:** V tomto případě se vodík vyrábí pyrolýzou metanu, kdy se metan za vysokých teplot rozkládá na vodík a pevný uhlík. Tento proces má nižší uhlíkovou stopu než SMR, a protože při něm vzniká pevný uhlík, nedochází k emisím CO₂. Tato technologie je však stále v počátečních fázích vývoje. [5],[6]



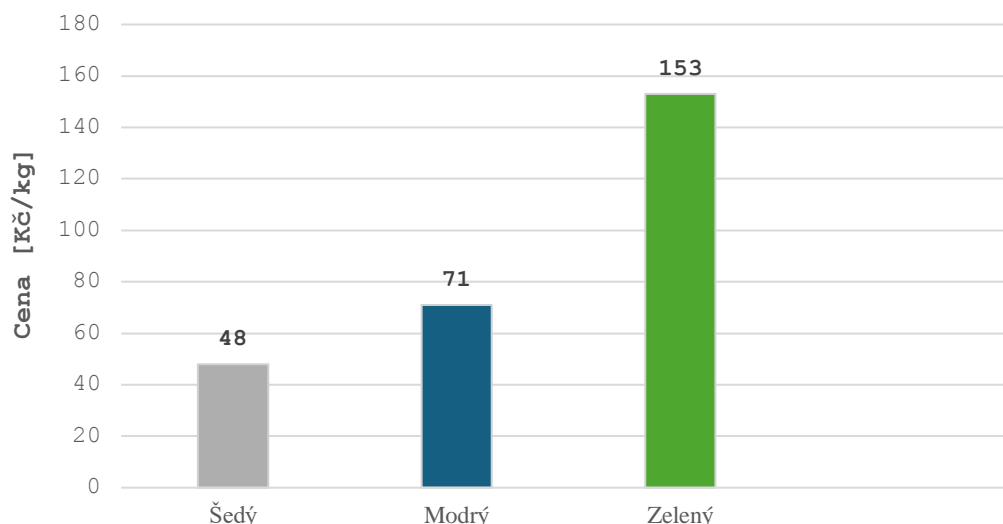
Graf 2.1 Globální produkce vodíku dle zdrojů [5]

2.2. Ekonomika vodíku

V současné době není vodík ve většině aplikací ekonomicky konkurenceschopný oproti konvenčním fosilním palivům kvůli vysokým nákladům na výrobu, skladování a dopravu. Většina komerčně vyráběného vodíku je šedý vodík, který se vyrábí ze zemního plynu pomocí parního reformování metanu (SMR) a stojí přibližně 1,50 až 2,00 \$ (35-48 Kč) za kilogram. Tento proces je sice ekonomicky výhodný vzhledem k nízkým cenám zemního plynu, ale je spojen s velkými emisemi oxidu uhličitého. [4],[5]

Modrý vodík, který využívá zachycování a ukládání uhlíku (CCS) v procesech šedého vodíku, mírně zvyšuje náklady 2,00 až 3,00 \$ (48-71 Kč) za kilogram a zároveň snižuje emise uhlíku. Infrastruktura pro CCS však zatím není rozšířená a její ekonomika je silně ovlivněna mechanismy stanovování cen uhlíku, které jsou na světových trzích nejednotné. [2],[4],[5]

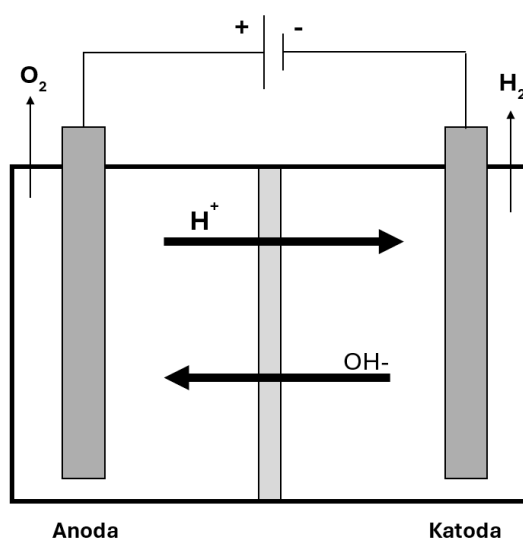
Zelený vodík, vyráběný elektrolýzou z obnovitelné energie, zůstává v současnosti nejdražší variantou s náklady v rozmezí 3,00 až 6,50 \$ (71-153 Kč) za kilogram. Vysoké náklady jsou způsobeny především cenami elektřiny z obnovitelných zdrojů, investičními náklady spojenými s elektrolýzery a účinností výroby. [2],[4],[5]



Graf 2.2 Cena výroby vodíku [7]

2.3. Produkce vodíku

Elektrolýza je elektrochemický proces, při kterém se elektrická energie využívá k vytvoření nesamovolné chemické reakce. Průchodem elektřiny vodou dochází k disociaci molekul vody na vodík a kyslík. Základ procesu je znázorněn na Obr.2.1. Dvě kovové elektrody jsou spojeny přívodem stejnosměrného proudu tvořící anodu a katodu. Proud prochází roztokem tak, že vodíkové ionty přecházejí z anody na katodu a hydroxylové ionty z katody na anodu. Na katodě jsou vodíkové ionty neutralizovány elektrony dodávanými elektrickým obvodem za vzniku plynného vodíku, který se tvoří jako bubliny kolem katody a je odváděn ven z článku. [8]



Obrázek 2.1 Schéma procesu elektrolýzy [10]

Elektrolýza probíhá v zařízení zvané elektrolyzér, který se skládá ze dvou elektrod, anody (kladné) a katody (záporné), ponořených do roztoku elektrolytu (elektrolyt může být i pevného skupenství viz. dále), který usnadňuje vedení iontů. Při použití stejnosměrného proudu se na katodě redukují molekuly vody, což vede k produkci plynného vodíku a hydroxidových iontů podle katodové reakce:



Na anodě dochází k oxidaci, při níž se hydroxidové ionty přeměňují na plynný kyslík a vodu, přičemž se elektrony uvolňují zpět do obvodu. Tento proces se popisuje jako anodová reakce:



Celkovou elektrolýzu vody lze tedy znázornit součtem těchto dvou rovnic a zjednodušit na jednu rovnici, kde můžeme vidět, že stechiometrický vyrobený poměr je v poměru 2:1 (vodík: kyslík):



Výroba vodíku pomocí kyselého elektrolytu jednoduše vyžaduje neutralizaci vodíkových iontů a následné spojení za vzniku molekul vodíku. Protože se vodíkové ionty shromažďují kolem katody, vzniká při tomto procesu určitý odpor, k čemuž dochází, když se koncentrace reaktantů na povrchu elektrody liší od koncentrace v roztoku. Typicky vzniká, když je rychlost reakce dostatečně vysoká, aby transport reaktivních iontů na povrch elektrody nestíhal, což vede k vyčerpání reaktantů přímo na povrchu. U kovové platiny je tento proces snadno překonatelný a platina je často optimální volbou pro zařazení do katody. Použití ušlechtilých kovů v katodě zvyšuje investiční náklady elektrolytického článku.[8],[10],[11]

2.4. Elektrolyzéry

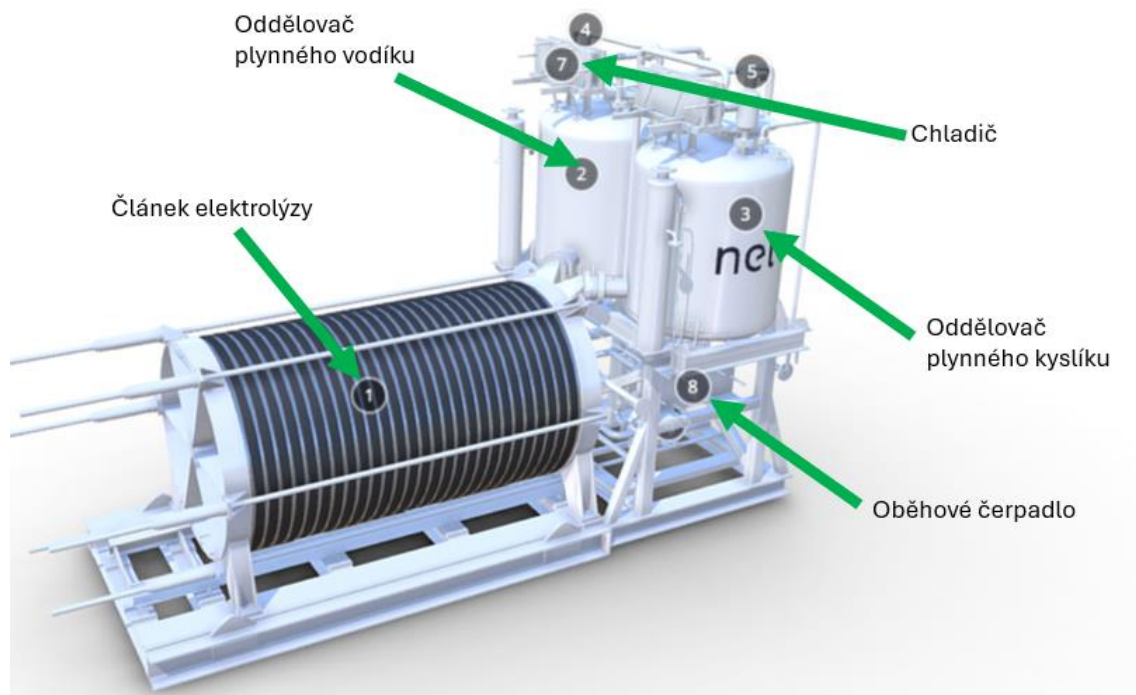
Elektrolyzéry jsou elektrochemická zařízení, která mají dvě elektrody a mezi nimi se nachází vodivý elektrolyt, jak bylo popsáno výše. Tato zařízení se mimo jiného liší podle typu elektrolytu. Aktuálně existují čtyři typy elektrolyzérů, z čehož dva lze označit za komerčně využívané a fungující a těmi jsou alkalické elektrolyzéry a elektrolyzéry s protonovou výměnnou membránou známé pod zkratkou PEM. Dále jsou vyvíjeny technologie elektrolyzérů s elektrolytickým článkem na bázi pevných oxidů (SOEC) a s aniontovou výměnnou membránou (AEM). Níže jsou zmíněné technologie popsány se zaměřením na jejich konstrukci, fungování a příslušné výhody a nevýhody. [10]

2.4.1. Alkalický elektrolyzér

Voda je špatný elektrický vodič s nízkou mírou ionizace na vodíkové a hydroxylové ionty. To značně omezuje rychlost transformace iontů ve vodě, která určuje rychlost produkce vodíku a která je úměrná proudu procházejícímu článkem. Přenos iontů lze zvýšit rozpuštěním iontových materiálů ve vodě příměsí kyselin, zásad nebo solí. Použití solí je problematické v tom, že v závislosti na poloze aniontu a kationtu v elektrochemické řadě se mohou uvolňovat jiné látky než vodík a kyslík. Protože se sůl (chlorid sodný) běžně vyskytuje v dodávkách vody, znamená to, že voda, která má být použita, musí být upravena tak, aby byly odstraněny soli, které by jinak ohrozily uvolňování kyslíku a vodíku. [10], [12], [13]

Alkalické elektrolyzéry jsou nejstarším typem technologie elektrolýzy. Jako elektrolyt používají vodný alkalický roztok hydroxidu draselného (KOH) nebo hydroxidu sodného (NaOH). Základní části jsou dvě elektrody (anoda a katoda) oddělené porézní membránou, která zabraňuje mísení vznikajících plynů, ale umožňuje průchod iontů. [14]

Elektrická účinnost článku je udávána v rozmezí obvykle 62-82 % na základě spalného tepla vodíku. Jedná se o účinnost samotné elektrochemické reakce, ke které je nutné připočítat ještě energetickou náročnost přídatných systémů, bez kterých by nemohl elektrolyzér pracovat. Celková účinnost systému je potom přibližně 47-69 % při zahrnutí přídatných systémů. [10], [12], [13]



Obrázek 2.2 Popis částí alkalického elektrolyzéry [16]

Hydroxylové ionty (OH^-) z rozpuštěného KOH umožňují účinné iontové vedení mezi elektrodami pro elektrolýzu. Vysoce alkalický charakter (vysoké pH) zabraňuje tvorbě vodíkových iontů, které by urychlovaly korozi. Rozsah koncentrace 25-30 % je optimální pro vyvážení iontové vodivosti a zároveň zabraňuje problémům, jako je nadměrná tvorba vnitřního tepla nebo srážení draslíku. [10], [11]

Klíčový problém souvisí s řízením a koncentrací kapalného alkalického roztoku elektrolytu. V alkalickém elektrolyzéry musí tento koncentrovaný roztok hydroxidu draselného (KOH) nebo hydroxidu sodného (NaOH) neustále cirkulovat mezi elektrodami. Při nízkých výkonech se rychlost produkce elektrolytického plynu (H_2 a O_2) výrazně zpomaluje. Tento snížený vývin plynu ovlivňuje míchání a cirkulaci roztoku elektrolytu. Elektrolyt může v určitých oblastech stagnovat bez intenzivního probublávání plynu, které vyvolá míchání. Pokud k tomu dojde, koncentrace elektrolytu již není homogenní a v člancích mohou vznikat koncentrované a ochuzené zóny. [10], [12]

To je problematické zejména při výkonu pod 20 % jmenovitého výkonu, kdy je vývin plynu, který pohání cirkulaci a míchání elektrolytu, velmi minimální. Aby se zabránilo těmto "koncentračním efektům", mají alkalické systémy minimální limity částečného zatížení, obvykle kolem 20-30 % jmenovitého výkonu. [10], [16]

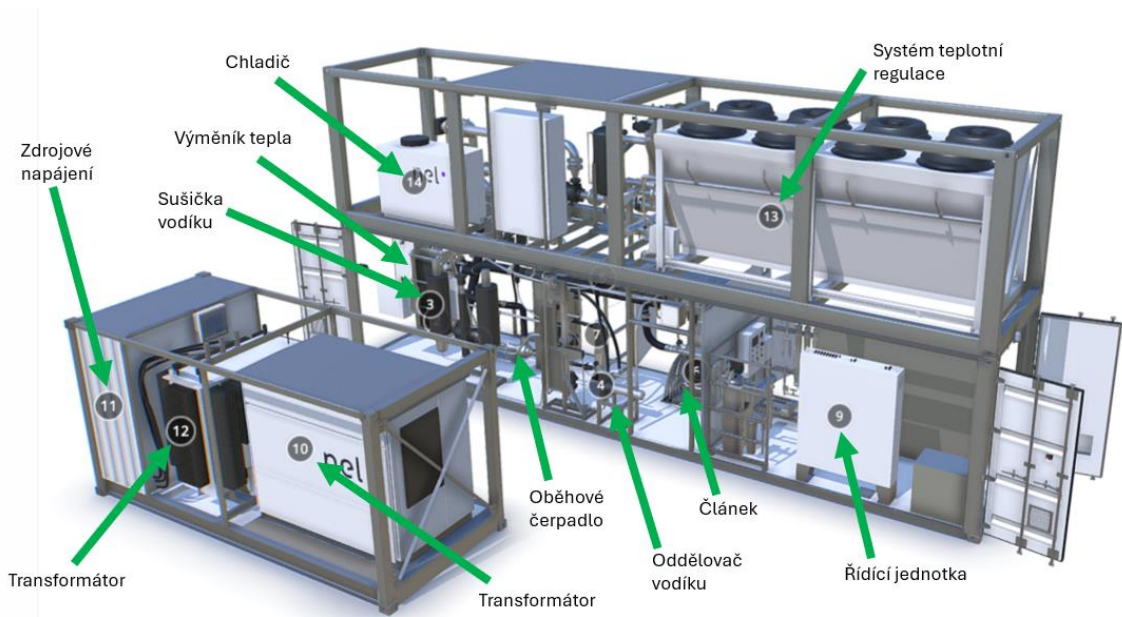
2.4.2. PEM Elektrolyzér

Elektrolyzéry s protonovou výměnnou membránou (PEM) jsou novější technologie na výrobu vodíku, která využívá pevný polymerní elektrolyt k usnadnění elektrochemického štěpení vody na vodík a kyslík. Voda je přivedena k anodě, kde ztrácejí molekuly vody elektrony (oxidace) a stávají se plynným kyslíkem, protony a volnými elektrony. Protony (H^+) vzniklé na anodě putují přes pevnou polymerní membránu ke katodě.

Na katodě se tyto protony spojí s elektrony (dodanými z vnějšího obvodu) za vzniku plynného vodíku. Toto uspořádání umožňuje elektrolyzérům PEM efektivně pracovat při vyšších tlacích a proudových hustotách, což může být zvláště výhodné při integraci s dynamickými obnovitelnými zdroji energie, jako je větrná a solární energie. Dokáží tedy využít větší rozsah výkonu a lze je provozovat v rozmezí 5-100 % jmenovitého výkonu. [16]

Výhoda pevné membrány je v tom, že nezpůsobuje korozi elektrod jako je tomu u kapalného elektrolytu a tím se snižují náklady na údržbu. Není potřeba odstraňovat přimíchané sloučeniny jako KOH u alkalických elektrolyzérů. Naopak PEM elektrolyzéry prodražují vzácné kovy, které jsou použity jako katalyzátor na elektrodách. Nejčastěji se používá platina. [10], [16]

Tento typ elektrolyzéro je charakterizován nízkými ohmickými ztrátami a velmi vysokou čistotou vyrobeného vodíku. Velmi čistý vodík je vhodný pro návazné aplikace v palivových člancích. Protože elektrolyzér pracuje s pevným elektrolytem, může mít menší objem, než jaký je potřebný v případě kapalného elektrolytu. To umožňuje vyrábět PEM elektrolyzéry v kompaktnějších rozměrech. Většinou jsou systémy dodávány v tzv. kontejnerové variantě, která lze vidět na obrázku 2.3. [17]



Obrázek 2.3 Popis částí elektrolyzérů s proton-výměnnou membránou [17]

2.4.3. Elektrolyzér SOE

Elektrolyzér na bázi pevných oxidů (SOE) je typem vysokoteplotní elektrolýzy. Tato zařízení pracují s využitím pevných keramických materiálů jako elektrolytu, které mohou vést ionty kyslíku při vysokých teplotách. Elektrolyt se obvykle vyrábí z oxidu zirkoničitého stabilizovaného oxidem yttria, který se při vysokých teplotách (obvykle 500-850 °C) stává vodičem iontů kyslíku. SOE nejsou zatím komerčně využívány a do budoucna mohou mít potenciál zejména se zdroji vysokoteplotního tepla, jako je odpadní teplo z průmyslových procesů nebo teplo generované jadernou energií.

Elektrolyzéry SOE fungují na principu vysokoteplotní elektrolýzy vodní párou. Prvním požadavkem pro provoz SOE je zahřátí systému na vysokou teplotu (500-850 °C). Voda ve formě páry se zavádí na katodu. Na rozdíl od tradičních nízkoteplotních elektrolyzérů spotřebovávají SOE k pohonu endotermické reakce štěpení vody společně s elektrickou energií také velký podíl tepelné energie. Teplo výrazně zvyšuje účinnost procesu elektrolýzy tím, že zvyšuje iontovou vodivost keramického elektrolytu. [10],[16]

2.4.4. Elektrolyzér AEM

Chemie elektrolyzérů s aniontovou výměnnou membránou (AEM) je obdobná jako u alkalických elektrolyzérů, kde se přes membránu transportují hydroxylové ionty (OH⁻). Podobně jako u alkalických elektrolyzérů jsou elektrochemické reakce na katodě a anodě v systémech AEM katalyzovány niklovými elektrodami.

Vysoce kyselé prostředí v elektrolyzérech PEM znamená, že na bipolárních deskách jsou nutné drahé titanové povlaky. V elektrolyzérech AEM je potřebná koncentrace hydroxidu draselného (KOH) podstatně nižší (do 1 %) ve srovnání s obvykle vyššími koncentracemi (20-30 %) používanými v alkalických elektrolyzérech a je možné používat Nikl, který je levnější než iridium a platina používané v elektrolyzérech PEM. Z konstrukčního hlediska je výhodou elektrolyzérů AEM kompaktní architektura článků podobná architektuře elektrolyzérů PEM tudíž mohou pracovat stejně flexibilně jako elektrolyzéry PEM bez výrazného křížení H₂ a O₂.

Elektrolyzéry kombinují výhody alkalického a PEM elektrolyzéry, ovšem je stále zapotřebí značného technologického vývoje, aby se tato technologie stala konkurenceschopnou. Klíčovým problémem je například životnost membrán, protože současné membrány jsou velmi citlivé na kyslík a jejich výrobní náklady jsou vysoké.[34]

2.4.5. Porovnání typů elektrolyzérů

Výše uvedené kapitoly popisují jednotlivé druhy elektrolyzérů, jejichž hlavní parametry jsou porovnány v tabulce 2.2.

Tabulka 2.2 Porovnání základních parametrů jednotlivých elektrolyzérů [4],[10]

Typ elektrolyzéro	Alkalický	PEM	SOE	AEM
Elektrolyt	KOH	Polymer (Nafion)	Keramický	Uhlovodíkový polymer
Katoda	Nikl/Fe	Platina	Nikl, keramika	Nikl
Anoda	Nikl, Kobalt	Iridium, Ruthenium	Keramika, Zirkonium, Ytrium	Nikl, Železo, Kobalt
Provozní teplota [°C]	70-90	40-80	700-1000	40-60

Provozní tlak [bar]	<30	<30	1	<35
Životnost max [h]	60 000-100 000	50 000-80 000	<20 000	>5 000
Provozní rozsah výkonu [%]	20-100	5-100	30-100	5-100
Proudová hustota [A/cm ²]	0,2-2	1-2	0,3-1	0,2-2
Napětí článku [V]	1,8-2,4	1,4-2,5	1-1,5	1,4-2
Účinnost systému [%]	50-68	50-68	75-85	52-67
Spotřeba elektrické energie článku [kWh/kg]	47-66	47-66	35-50	52-66
Spotřeba elektrické energie systému [kWh/kg]	50-78	50-83	40-50	57-69
Investiční náklady [\$/kW]	300-1000	400-1400	>2000	1000-3000

Pro rezidenční projekt, kde bude elektrolyzér napájen solární energií, je výhodné použít elektrolyzér typu PEM (s protonovou výměnnou membránou). PEM elektrolyzéry mohou mnohem lépe reagovat na kolísavý a přerušovaný příkon solárních panelů. Jejich pevný polymerní elektrolyt umožňuje rychlejší elektrickou odezvu ve srovnání s kapalným elektrolytem alkalických. Výkon fotovoltaiky by samozřejmě mohl být vyhlazován pomocí bateriového systému, ale pouze za cenu vyšších investičních nákladů. V porovnání s většími alkalickými systémy je kompaktní konstrukce PEM článků s menšími rozměry výhodná pro omezený prostor pro instalaci v obytné lokalitě.

2.4.6. Cíle pro rok 2050 ve vývoji elektrolyzérů

Na vývoj elektrolyzérů je kladen velký tlak a aby se stala produkce vodíku ekonomická a konkurence schopná je nutné zlepšit výkonnostní parametry elektrolyzérů. V tabulce jsou uvedeny cíle, které by měly být splněny do roku 2050.

Tabulka 2.3 Souhrn plánovaných parametrů pro jednotlivé typy elektrolyzérů do roka 2050 [5]

	Alkalický	PEM	SOE	AEM
Provozní teplota [°C]	>90	80	<600	80
Provozní tlak [bar]	>30	>70	>20	>70
Komerční velikost [MW]	10	10	0,2	2
Životnost max [h]	100 000	100 000-120 000	80 000	>100 000
Provozní rozsah výkonu [%]	5-100	5-100	0-100	5-100
Proudová hustota [A/cm ²]	>2	4-6	>2	>2
Napětí článku [V]	<1,7	<1,7	<1,48	<2
Účinnost systému [%]	>70	>80	>85	>75
Spotřeba elektrické energie článku [kWh/kg]	<42	<42	<35	<42
Spotřeba elektrické energie systému [kWh/kg]	<45	<45	<40	<45

2.5. Provozní parametry elektrolyzéro

Pro elektrolyzéry jsou relevantní tři typy účinností: Faradayova účinnost, napěťová účinnost a účinnost stejnosměrného proudu. Tyto účinnosti jsou nezbytné pro optimalizaci jejich provozu a zvýšení jejich ekonomické životaschopnosti.

2.5.1. Proudová hustota

Velký vliv na produkci vodíku má proudová hustota, protože je přímo úměrná množství výroby vodíku (viz vzorec 2.4). Čím vyšší proudová hustota, tím vyšší míra produkce vodíku a můžeme jí vyjádřit vztahem 2.4.

$$\dot{n}_{id H_2} = \frac{I}{zF} \quad (2.4)$$

kde

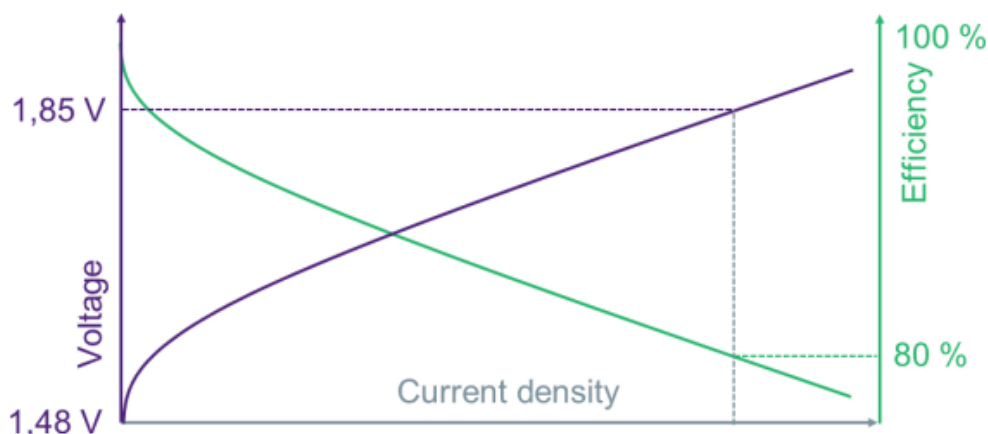
$\dot{n}_{id H_2}$ je molární průtok plynného vodíku,

z je počet elektronů, které se podílejí na reakci,

I je proudová hustota,

F je Faradayova konstanta.

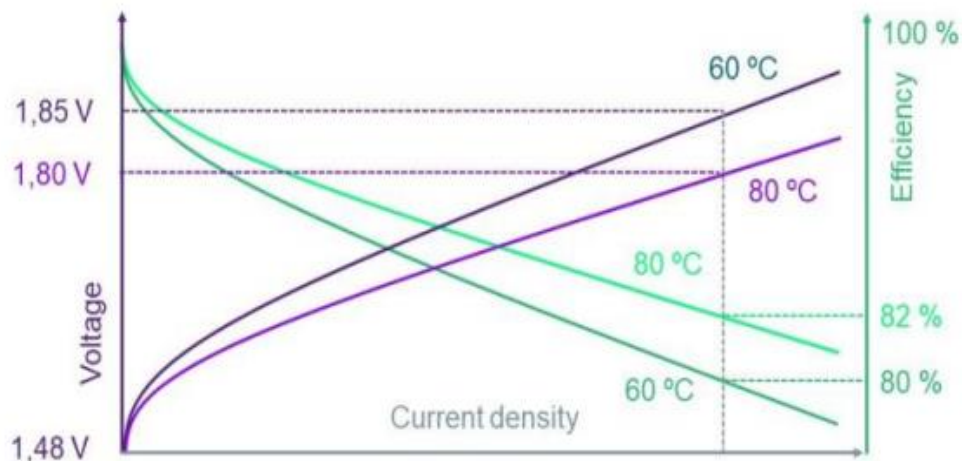
Ze vztahu 2.4 lze odvodit, že provozní náklady na elektrolyzér se zvyšují při nižší proudové hustotě. Správná proudová hustota by měla být vždy optimalizována s cílem minimalizovat náklady na výrobu vodíku. Výkonová křivka elektrolyzéro je obvykle znázorněna volt-ampérovou charakteristikou a je uvedena na grafu. 2.3.



Graf 2.3 Závislost proudové hustoty na napětí a účinnosti [18]

2.5.2. Teplota

Významný vliv na účinnost elektrolyzéro má teplota. Rychlost katalytické reakce i specifický elektrický odpor jsou silně závislé na teplotě. Čím vyšší je teplota, tím vyšší je účinnost. Ovšem teplota má významný vliv i na stárnutí systému, a tím i na životnost elektrolyzéro. Čím vyšší je teplota, tím nižší je životnost. Správná provozní teplota by měla být vždy optimalizována s cílem minimalizovat náklady na výrobu vodíku. [18]



Graf 2.4 Změna účinnosti se změnou teploty průběhu elektrolýzy

2.5.3. Účinnost

Faradayova účinnost je účinnost přeměny elektrického náboje na plynný vodík. Je definována jako poměr skutečně vyrobeného a technicky využitelného objemu vodíku k teoretickému maximálnímu objemu, který by mohl být vyroben za ideálních podmínek. Tato účinnost zohledňuje ztráty, jako je difúze vodíku přes membránu, ztráty elektrického proudu a ztráty vodíku při čištění v důsledku kontaminace kyslíkem. [18]

$$\varepsilon_F = \frac{\dot{m}_{re H_2}}{\dot{m}_{id H_2}} \quad (2.4)$$

Kde:

$\dot{m}_{re H_2}$ je skutečný objem výroby použitelného vodíku

$\dot{m}_{id H_2}$ je maximální možný objem výroby vodíku za ideálních podmínek

Napět'ová účinnost je definována jako podíl termoneutralního napětí a naměřeného napětí článku. Napětí článku zahrnuje také katalytické prvky a elektrické ztráty v elektrochemickém systému napájeném stejnosměrným proudem. Termoneutralní napětí pro elektrolýzu je rovné 1,48V. Napět'ová účinnost je vyjádřena vztahem 2.5. [16],[18]

$$\varepsilon_V = \frac{E_{TH}}{E_{cell}(i, T)} \quad (2.5)$$

kde

ε_V je napěťová účinnost,

E_{TH} termoneutrální napětí,

$E_{cell}(i, T)$ je naměřené napětí na článku.

Účinnost stejnosměrného proudu se vztahuje k energetické účinnosti elektrolyzáru nebo modulu a vyjadřuje poměr elektrické energie dodané do elektrolyzáru ve formě stejnosměrného proudu k energetickému obsahu vyrobeného vodíku. [18]

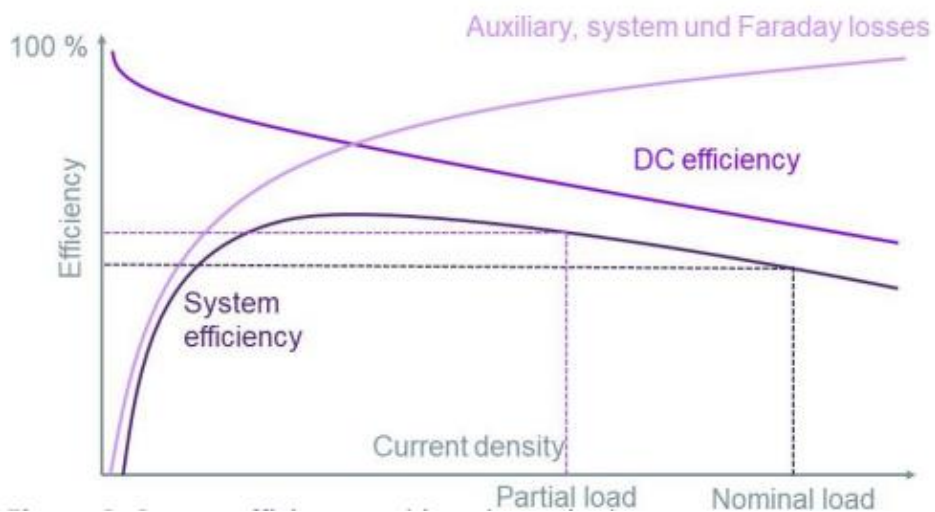
$$\varepsilon_{DC} = \frac{E_{LHVH_2}}{P_{el,DC}} \quad (2.6)$$

Kde

ε_{DC} je účinnost stejnosměrného proudu,

E_{LHVH_2} je energie vodíku na výstupu,

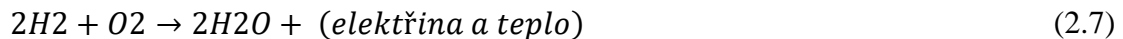
$P_{el,DC}$ je energie vložená do procesu.



Graf 2.5 Účinnost systému a jeho schematický tvar [18]

2.6. Spotřeba vodíku

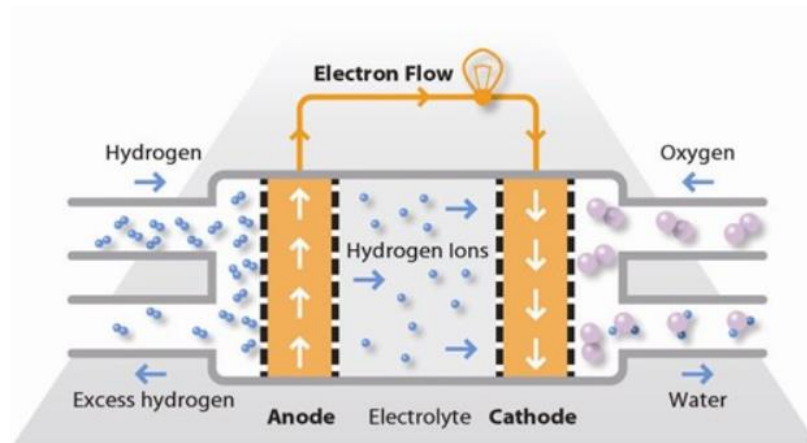
Zařízení, které je schopné přeměnit chemickou energii vodíku na tepelnou a elektrickou energii (stejnoseměrný proud) se nazývá palivový článek. Vodíkové palivové články jsou elektrochemická zařízení, která přeměňují chemickou energii vodíku na energii elektrickou prostřednictvím redoxní reakce s kyslíkem. Základní struktura vodíkového palivového článku se skládá z anody, katody, elektrolytu a bipolárních desek. Jádrem činnosti článku je přívod plynného vodíku k anodě, kde dochází ke katalytické reakci, při níž se vodík štěpí na protony a elektrony. Protony procházejí elektrolytem a dostávají se ke katodě, zatímco elektrony procházejí vnějším obvodem a vyrábějí elektřinu. Na katodě se protony, elektrony a kyslík spojí za vzniku vody, čímž se elektrochemická reakce dokončí. Tento proces lze shrnout reakcí 2.7.



2.6.1. Palivový článek AFC

Alkalické palivové články (AFC) obdobně jako alkalické elektrolyzéry využívají jako elektrolyt vodný roztok hydroxidu draselného (KOH). Tento roztok vede hydroxylové ionty (OH⁻) z katody k anodě. AFC mohou pracovat při teplotách od 70 °C do 100 °C a často používají katalyzátory z neušlechtilých kovů, jako je nikl na anodě a stříbro nebo oxidy kovů na katodě, což je činí cenově výhodnějšími z hlediska materiálu katalyzátoru.

V AFC reaguje plynný vodík zavedený na anodu s hydroxylovými ionty za vzniku vody a elektronů. Elektrony proudí vnějším obvodem a vyrábějí elektřinu, zatímco molekuly vody migrují ke katodě. Účinnost AFC článků se pohybuje maximálně okolo 60% při výrobě elektrické energie. Kombinované systémy, kde lze využít i produkované teplo dosahují celkové účinnosti okolo 87 %. [10], [19],[20],[36]



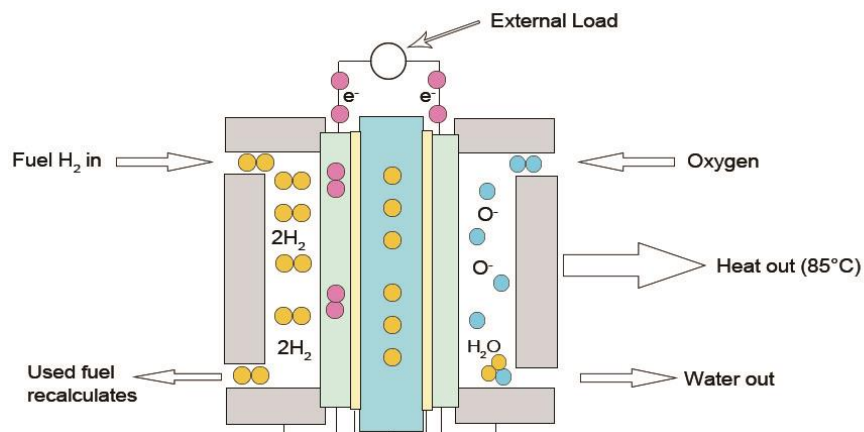
Obrázek 2.4 Schéma procesu alkalického palivového článku [21]

2.6.2. Palivový článek PEMFC

Palivové články s protonovou výměnou (PEMFC) používají k vedení protonů z anody na katodu membránu z pevného polymerního elektrolytu, obvykle vyrobenou z Nafionu¹. Na obou elektrodách se používají katalyzátory na bázi platiny, které usnadňují oxidační reakce vodíku a redukční reakce kyslíku. PEMFC pracují při relativně nízkých teplotách, obvykle mezi 60 °C a 80 °C. [10],[20]

Na anodě dochází k disociaci molekul vodíku na protony a elektrony. Protony migrují polymerní membránou, zatímco elektrony proudí vnějším obvodem a vytvářejí elektrický proud. Na katodě reagují protony, elektrony a kyslík za vzniku vody, která je jediným vedlejším produktem. PEMFC jsou oblíbené pro aplikace vyžadující vysokou hustotu výkonu a rychlou odezvu. Potýkají se však s problémy souvisejícími s vysokou cenou platinových katalyzátorů a citlivostí na nečistoty ve vodíkovém palivu, které mohou katalyzátory poničit a snížit účinnost. [21],[35]

¹ Nafion je obchodní název pro fluoropolymerový kopolymer na bázi sulfonovaného tetrafluorethylenu, který objevil na konci 60. let Dr. Walther Grot ze společnosti DuPont.



Obrázek 2.5 Schéma procesu palivového článku PEM [35]

2.6.3. Spalování vodíku v KGJ

Kogenerační jednotky, známé také jako systémy kombinované výroby tepla a elektřiny (KVET), energetické systémy dosahující účinnosti 90 %, které z jednoho zdroje paliva současně vyrábějí elektřinu a teplo. Jsou vhodné zejména pro průmyslové podniky, velké obytné komplexy a systémy dálkového vytápění, kde je stálá poptávka po elektřině i teple. Tradičně se v těchto jednotkách používá zemní plyn nebo jiná fosilní paliva, avšak spalování vodíku v kogeneračních jednotkách je vzhledem k důrazu na využívání obnovitelných zdrojů energie také možností. Již nyní jsou na trhu kogenerační jednotky, které jsou připraveny na příměs 20 % vodíku a do budoucna se má tento poměr zvyšovat. [22]

V kogenerační jednotce na vodík se plynný vodík spaluje v plynové turbíně nebo spalovacím motoru. Při spalování vznikají vysokoteplotní plyny, které pohánějí turbínu a vyrábějí elektřinu. Výfukové plyny, které stále obsahují značné množství tepelné energie, se pak využívají ve výměníku tepla k výrobě páry nebo horké vody pro účely vytápění. Tento dvojitý výrobní proces maximalizuje energii získanou z použitého paliva.

3. Energetická bilance čtvrti

Řešené území se nachází na území městské části Praha – Dolní Počernice. Jedná se o nezastavěné pozemky podél Českobrodské ulice, v současnosti využívané jako zemědělská půda. Na území je plánovaná výstavba obytné čtvrti ve dvou etapách. Předmětem této práce je druhá etapa. Struktura dané čtvrti je systematicky rozčleněna do standardizovaných bloků, jejichž individuální charakteristiky a specifika jsou následně podrobně rozvedena v následujících kapitolách. Obytná čtvrť se navrhuje tak, aby v budoucnu splnila energetický standard NZEB (budovy s téměř nulovou spotřebou energie).

V této kapitole byla vypočtena potřeba tepla na vytápění, potřeba tepla na přípravu teplé, potřeba elektrické energie, produkce fotovoltaické elektrárny a přebytky, které lze využít k výrobě vodíku. Podrobný výpočet pro potřebu tepla a přípravu teplé vody byl proveden na čtyřech modelových příkladech, a to pro dům BD1 – 3 NP s orientací jih/sever a východ/západ a pro dům BD3- 3 NP s orientací jih/sever a východ/západ, ze kterých byly vytvořeny měrné jednotky vypočtených parametrů, které se použily pro výpočet celého souboru budov. Potřeba elektrické energie a výroba fotovoltaické elektrárny byla spočtena jako celek za celý soubor budov.

3.1. Popis budov

Soubor budov je tvořen ze standardizovaných modulů, ze kterých se skládají všechny bloky obytné čtvrti. Bytové bloky jsou tvořeny z modulů s rozměrem 8x10 m s variantní výškou, která dosahuje maximálně 4 NP, tedy 13,3 m. Je počítáno s dvěma typy domů. Dům typu BD1 je složen ze dvou modulů a typ domu BD3 je složen z šesti modulů.

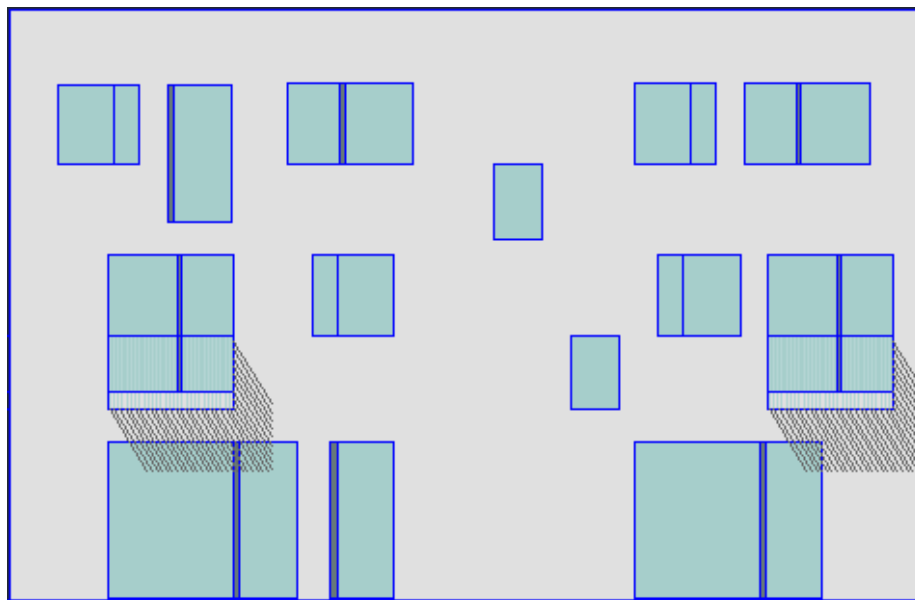
- Dům typ BD1
- Dům typ BD3

Jednotlivé typy domů se od sebe liší hlavně velikostí dále uspořádáním bytových jednotek, ale to není pro výpočet bráno v potaz. Byty jsou orientovány jak do obytné zóny, tak do zahrádek ve vnitrobloku. Při rozdílných výškách modulů jsou na střeše nižšího umístěny terasy k bytům nebo pro celý dům. V tabulce 3.1 jsou uvedeny základní parametry pro každý typ domu. Na obrázku 3.1 a 3.2 je zobrazen přední a boční pohled

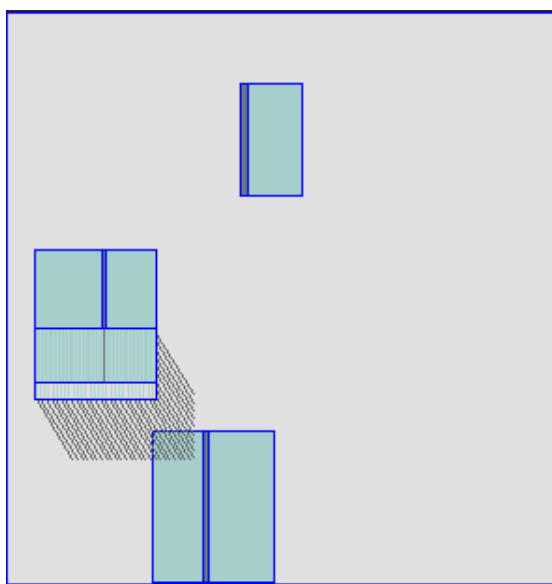
pro navržený dům BD1 a na obrázku 3.3 a 3.4 je zobrazen návrh domu typu BD3.

Tabulka 3.1 Základní parametry typů budov

	Dům BD1	Dům BD3
Maximální výška [m]	10,3	10,3
Počet modulů	2	6
Půdorys [m ²]	160	480
Celkový objem budovy [m ³]	1 648	4 944
Energeticky vztahná plocha [m ²]	480	1 360



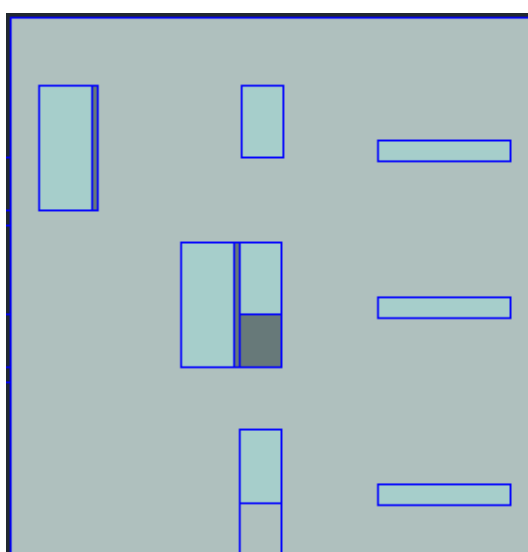
Obrázek 3.1 Typový dům BD1 – pohled zepředu.



Obrázek 3.2 Typový dům BD1 – pohled z boku



Obrázek 3.3 Typový dům BD3 – pohled zepředu.



Obrázek 3.4 Typový dům BD3 – pohled zepředu.

Uspořádání celého souboru budov je znázorněno na obrázku 3.5. Pro účely výpočtu, každému bloku bylo přiřazeno identifikační číslo a byly pro ně spočteny základní rozměrové parametry.



Obrázek 3.5 Situace obytné čtvrti

3.2. Klimatické podmínky

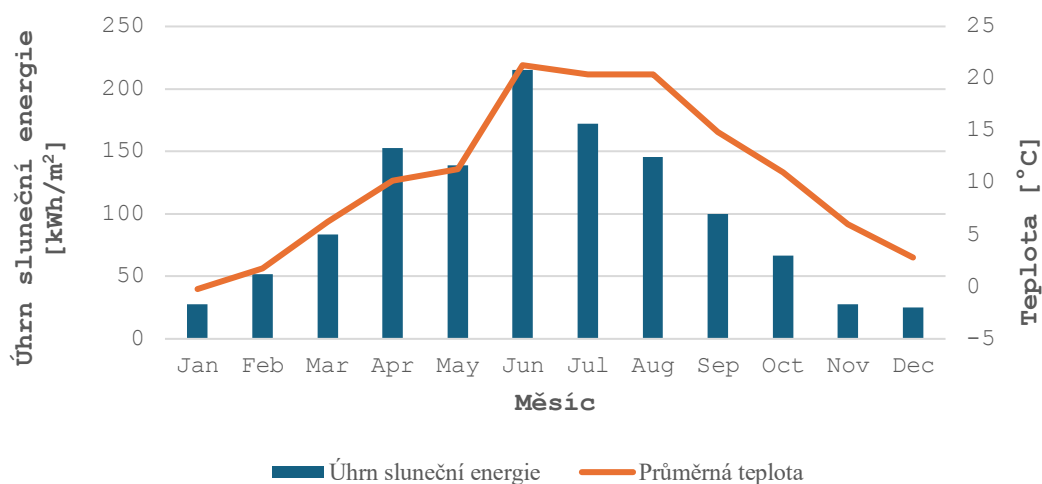
V práci jsem vycházel z dat poskytnutých z nástroje PVGIS, který vychází z databáze s názvem SARA2. Data v databázi poskytuje evropská organizace EUMETSAT, která k pořízení klimatických dat využívá meteorologických družic, u kterých je také zodpovědná za jejich provoz a vypouštění na oběžnou dráhu. PV GIS byl vyvinut Společným výzkumným střediskem Evropské komise a je to nástroj, který slouží pro poskytování informací meteorologických dat. [23],[24]

Pro účely této práce byla využita data o slunečním záření a teplotě v dané lokalitě souboru budov pro rok 2019. Pro výpočet potřeby budov na vytápění bylo bráno ozáření dopadající na stěny budov ze všech světových stran. a pro výpočet výroby fotovoltaického systému byla brána data dopadající pod úhlem 35° pro jižně orientovaný systém a pro východní a západní orientaci úhel 15° . V tabulce 3.2. jsou uvedené roční úhrny dopadlé sluneční energie. PV GIS také poskytuje nástroje pro výpočet výroby fotovoltaické elektrárny, ale v této práci byla výroba navržené fotovoltaické elektrárny provedena vlastním výpočtem uvedený dále v práci.

Tabulka 3.2 Úhrn dopadlé sluneční energie na dopadající plochu

Orientace a úhel dopadající plochy	Úhrn dopadlé sluneční energie [kWh/m ²]
Vodorovná plocha 0°	1 207
Jih 35°	1 420
Západ 15°	1 185
Východ 15°	1 190

Na grafu 3.1 jsou znázorněny úhrny dopadlé sluneční energie po měsících na vodorovnou plochu a průběh průměrné měsíční teploty pro rok 2019.



Graf 3.1 Měsíční sluneční ozáření a průměrná měsíční teplota v roce 2019

3.3. Potřeba tepla na vytápění

Výpočet potřeby tepla na vytápění se řídí normou EN ISO 13790. Byla vypočtena měsíční potřeba tepla s klimatickými údaji pro rok 2019 pro čtyři typové domy. Vypočtená data byla následně přepočítaná do hodinových údajů. Pro výpočet potřeby tepla na vytápění bylo počítáno s tepelně-technickými parametry – součinitel prostupu tepla U , celkový součinitel prostupu sluneční energie g , neprůvzdušnost obálky budovy n_{50} a hygienická intenzita větrání n , jejichž hodnoty jsou společně s výpočtovými teplotami interiéru a

exteriéru uvedeny v tabulce 3.3. [25]

Tabulka 3.3 Tepelně technické vlastnosti

$U_{\text{fasáda}}$	0,22	W/m ² K
$U_{\text{střecha}}$	0,15	W/m ² K
U_{podlaha}	0,25	W/m ² K
U_{okna}	1	W/m ² K
g_{okna}	0,6	-
n_{50}	1,5	h ⁻¹
n	0,3	h ⁻¹
θ_i	20	°C
θ_e	-12	°C

Pro přípravu tepla na vytápění je nutné spočítat několik důležitých veličin. V této kapitole uvedu nejdůležitější výpočtové rovnice. Jako první byl spočten měrný tepelný tok prostupem obálky budovou H_T [W/K], který se stanoví podle vztahu

$$H_T = \sum_i A_i \cdot (U_i + \Delta U) \cdot f_{x,i} \quad (3.1)$$

kde je

A_i – Plocha konstrukce,

U_i – Součinitel prostupu tepla konstrukce,

$f_{x,i}$ – Koefficient prostupu tepla vzhledem k sousednímu prostoru.

Větrací průtok \dot{V}_f [m³/h] je spočten dle vztahu

$$\dot{V}_f = V_i \cdot n_{0,3} \quad (3.2)$$

kde je

V_i – větraný objem budovy,

$n_{0,3}$ - provozní intenzita větrání během roku.

Dále je potřeba spočítat průtok infiltrací \dot{V}_x [m³/h] pomocí vztahu

$$\dot{V}_x = 2 \cdot V_i \cdot n_{50} \cdot e \quad (3.3)$$

kde je

V_i – větraný objem budovy,

n_{50} - neprůvzdušnost obálky budovy.

e – součinitel větrné expozice.

Celkový průtok vzduchu je spočten pro variantu se vzduchotechnickým systémem dle vztahu

$$\dot{V} = \dot{V}_f (1 - \eta_{ZZT}) + \dot{V}_x \quad (3.4)$$

kde je

\dot{V}_x – průtok infiltrací,

\dot{V}_f - hygienický průtok.

η_{ZZT} -účinnost vzduchotechnického systému.

Měrný tepelný tok větráním H_v [W/K], byl vypočten dle vztahu

$$H_v = \dot{V} \cdot \rho_a \cdot c_a \quad (3.5)$$

kde je

\dot{V} - celkový průtok vzduchu,

ρ_a - hustota vzduchu,

c_a - měrná tepelná kapacita plynu.

Dále jsou spočteny měsíční potřeby tepla na vytápění. Pro získání potřeby tepla je jako první nutné spočítat ztráty tepla Q_L [kWh], které jsou vyjádřené dle vztahu

$$Q_L = H(\theta_i - \theta_e)t \quad (3.6)$$

kde je

H - měrný tepelný tok prostupem a větráním ($H_V + H_T$),

θ_i -výpočtová teplota interiéru,

θ_e -výpočtová teplota exteriéru,

t - čas.

Dále je potřeba znát tepelné zisky budovy, které se skládají z vnitřních tepelných zisků od osob a vybavení a ze solárních tepelných zisků. Je počítáno s typickou hodnotou vnitřních zisků 2 W/m^2 vztaženo na bytovou plochu. Tepelné zisky budovy Q_G [kWh] jsou vyjádřeny vztahem

$$Q_G = Q_i + Q_s \quad (3.7)$$

kde je

Q_i - vnitřní tepelné zisky,

Q_s - solární tepelné zisky.

Pro solární zisky je nutné znát účinnou sběrnou plochu solární energie A_s [m^2], což jsou v budovách plochy oken a vyjádří se vztahem

$$A_s = A \cdot F_S \cdot F_C \cdot (1 - F_F) \cdot g \quad (3.8)$$

kde je

A - plocha otvoru,

F_S - trvalé stínění = 0,9,

F_C - trvalé clonění = 0,9,

F_F - podíl rámu = 0,25,

g - součinitel prostupu sluneční energie.

Solární energie prostupuje do interiéru a vytváří solární zisky všemi otvory konstrukce ze všech světových stran. Data o dopadu slunečního záření na stěny budovy s úhlem 90° byly získané z nástroje PVGIS. Se znalostí účinné sběrné plochy, orientací budov a dat o dopadu sluneční energie lze spočítat solární zisky Q_S [kWh] dle vztahu

$$Q_S = \sum_j I_{s,j} \cdot \sum_j A_{s,nj} \quad (3.9)$$

kde je

A_S - účinná sběrná plocha solární energie pro každou světovou orientaci,

$I_{s,j}$ - úhrn dopadajícího slunečního záření pro každou světovou orientaci.

Pro získání potřeby tepla na vytápění je nutné ještě znát parametr účinnost využití zisků pro krytí ztrát tepla η_Q [-], která je vyjádřena vztahem

$$\eta_Q = \frac{a}{a+1} \quad \text{pro } \gamma = 1 \quad (3.10)$$

$$\eta_Q = \frac{1-\gamma^a}{1-\gamma^{a+1}} \quad \text{pro } \gamma \neq 1 \quad (3.11)$$

kde je

a - numerický parametr,

$$\gamma = \frac{Q_G}{Q_L}$$

Potřeba tepla na vytápění je nakonec vypočtena dle vztahu

$$Q_H = Q_L - \eta \cdot Q_G \quad (3.12)$$

kde je

Q_L - ztráta tepla,

Q_S - tepelné zisky budovy.

Výsledky pro typový dům BD1 s orientací sever/jih jsou uvedeny v tabulce 3.4.

Tabulka 3.4 Tabulka s výsledky potřeby tepla pro dům BD1 – sever/jih

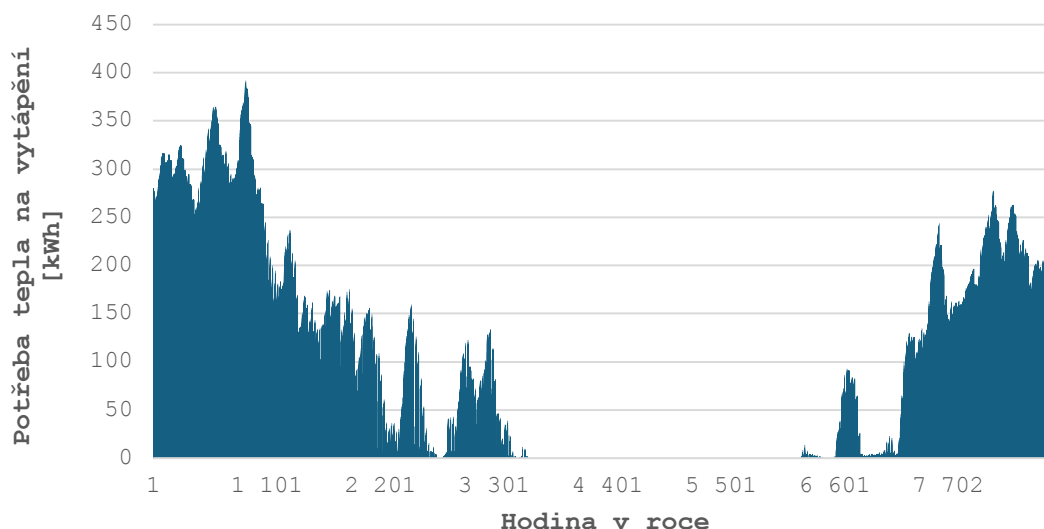
měsíc	Q_L	Q_S	Q_i	η	Q_H
	kWh	kWh	kWh	-	kWh
leden	4 610	1 241	536	0,99	2842
únor	3 758	2 034	484	0,95	1361
březen	3 136	2 460	536	0,85	581
duben	2 161	3 597	518	0,52	41
květen	1 983	2 991	536	0,55	49
červen					
červenec					
srpen					
září	1 139	2 730	518	0,35	4
říjen	2 058	2 438	536	0,65	111
listopad	3 085	1 135	518	0,98	1466
prosinec	3 923	1 323	536	0,99	2087

Souhrnné výsledky roční potřeby tepla na vytápění pro rok 2019 pro všechny typové domy jsou v tabulce 3.5.

Tabulka 3.5 Výsledky roční potřeby tepla na vytápění pro typové domy.

Typový dům	Q_{H2019}
	[MWh/rok]
BD1-3NP J-S	8,5
BD1-3NP Z-V	9,6
BD3-3NP J-S	20,1
BD3-3NP Z-V	24,1

Měsíční potřeby tepla na vytápění uvedené v tabulce 3.4 byly spočteny pro všechny čtyři typové domy a následně s využitím nástroje „Nástroj pro rozpočet měsíčních potřeb tepla do jednotlivých hodin vytvořený Jiřím Novotným“ byla měsíční data rozpočítaná do hodinových údajů o potřebě tepla na vytápění. Z hodinových dat byla vytvořena měrná jednotka pro potřebu tepla, se kterou byla spočtena potřeba tepla na vytápění pro každý blok v souboru budov a následně složen hodinový průběh potřeby tepla na vytápění pro celý soubor budov pro celý rok, který je vidět na grafu 3.2.



Graf 3.2 Potřeba tepla na vytápění pro soubor budov

Měrná jednotka pro potřebu tepla byla vytvořena z detailního výpočtu typových domů a jedná se o potřebu tepla na m^3 .

Tabulka 3.6 Měrné jednotky pro výpočet potřeby tepla pro soubor budov

Typový dům	Měrná jednotka Q_H [MWh/rok/ m^3]
BD1-3NP J-S	0,0052
BD1-3NP Z-V	0,0058
BD3-3NP J-S	0,0041
BD3-3NP Z-V	0,0049

3.4. Příprava teplé vody

V této kapitole je spočtena potřeba tepla na přípravu teplé vody, která se skládá z potřeby tepla na ohřev teplé vody a z denních ztrát, které jsou způsobené cirkulací vody v systému trubek nebo ztrátou tepla v akumulaci. Bylo počítáno s hodnotami u vedené v tabulce 3.7. Jako první je vypočtena denní potřeba tepla na ohřev teplé vody $Q_{W,den}$ [kWh/den] podle vztahu

$$Q_{W,den} = \frac{V_{TV,den} \cdot \rho \cdot c \cdot (t_{TV} - t_{SV})}{3,6 \cdot 10^6} \quad (3.13)$$

kde je

$V_{TV,den}$ - potřeba teplé vody na osobu,

ρ - hustota vody,

c -měrná tepelná kapacita vody,

t_{TV} - teplota teplé vody,

t_{SV} - teplota studené vody.

Tabulka 3.7 Hodnoty pro výpočet tepla na přípravu teplé vody

$V_{TV,den}$ - potřeba teplé vody na osobu	0,04	m ³ /os·den
ρ_{vody} - hustota vody	1000	kg/m ³
c – měrná tepelná kapacity vody	4200	J/kg·K
t_{TV}	55	°C
t_{SV}	10	°C
z – ztráty způsobené cirkulací	0,7	-

Výpočet je proveden opět pro všechny čtyři typové domy a poté pomocí měrných jednotek je spočtena potřeba tepla na přípravu teplé vody pro celý distrikt, které jsou v tabulce 3.8. V systému budovy dochází ke ztrátě tepla především kvůli cirkulaci v systému na přípravu teplé vody, které jsou značné. Ve výpočtech počítám s hodnotou 0,7. Denní ztráty tepla $Q_{W,z,den}$ [kWh/den] jsou vypočtené dle vztahu

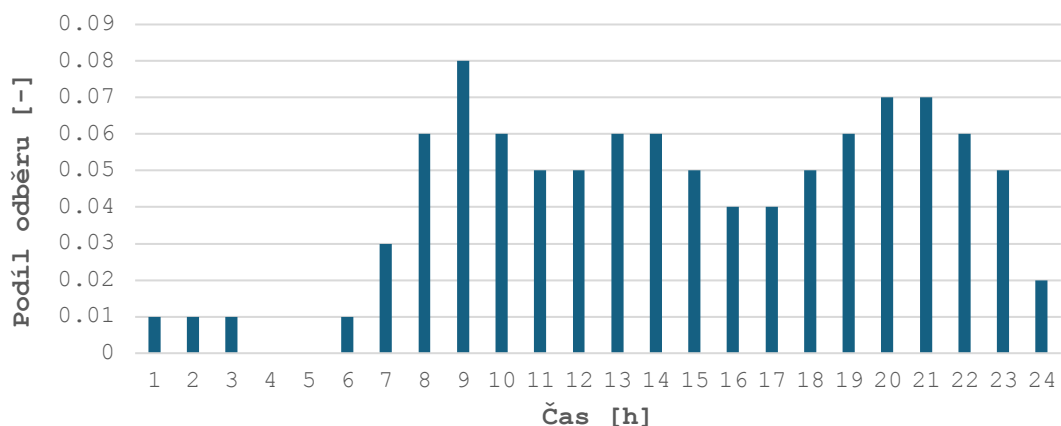
$$Q_{W,z,den} = z \cdot Q_{W,den} \quad (3.14)$$

kde je

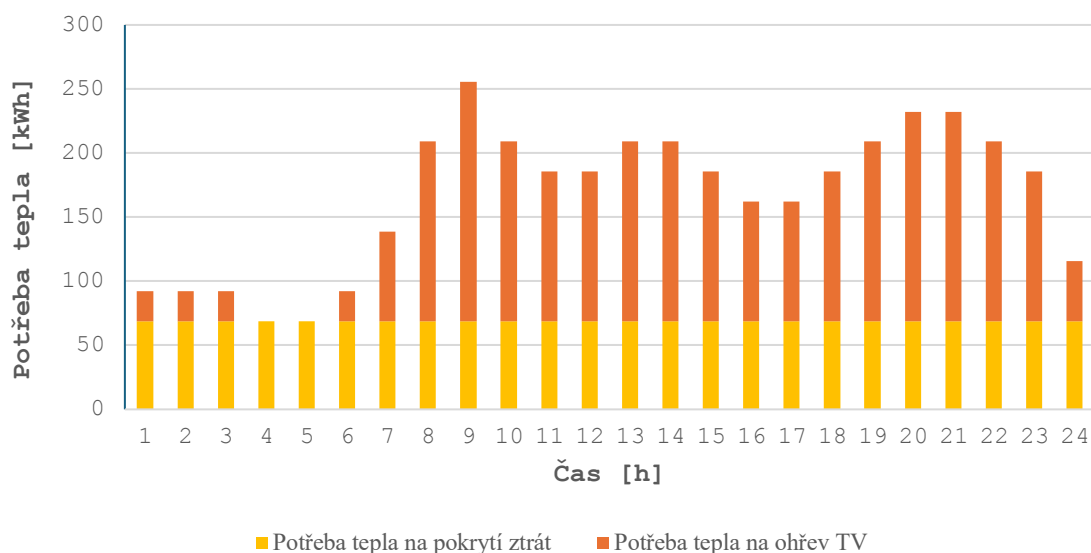
$Q_{W,den}$ - potřeba tepla na ohřev teplé vody,

z - ztráty vlivem cirkulace a akumulace.

Vypočítané denní údaje na potřebu tepla na přípravu teplé vody jsou podle odběrového diagramu z normy ČSN EN 12831-3 rozpočítány do průběhu dne. Ztráty se berou jako trvalé po celý den. Odběrový diagram je uveden na grafu 3.4 a denní potřeba tepla na přípravu teplé vody v souboru budov je na grafu 3.5.



Graf 3.3 Odběrový diagram teplé vody dle normy ČSN EN 12831-3



Graf 3.4 Potřeba tepla na přípravu teplé vody pro soubor budov

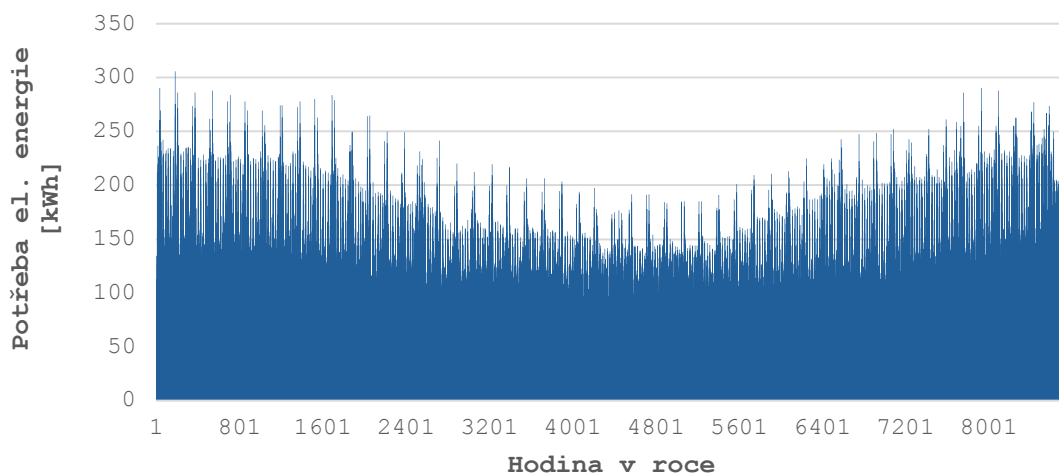
V tabulce 3.8 uvádím denní potřebu tepla na přípravu teplé vody pro všechny čtyři typy budov a měrné jednotky použité pro výpočet potřeby tepla na ohřev TV celého souboru budov. V páci bylo počítáno s osobami v budovách dle vztahu 31 m²/osoba.

Tabulka 3.8 Denní příprava tepla na přípravu teplé vody pro typové domy.

Typový dům	Potřeba tepla na přípravu teplé vody $Q_{W,den}$ [kWh/den]	Měrná jednotka $Q_{W,den}$ [kWh/den/osoba]
BD1-3NP J-S	42,84	0,149
BD1-3NP Z-V	42,84	0,149
BD3-3NP J-S	117,81	0,149
BD3-3NP Z-V	117,81	0,149

3.5. Bilance potřeby elektrické energie

Pro výpočet potřeby elektrické energie souboru budov byla uvažována průměrná spotřeba elektrické energie 25 kWh/m²·rok. Vzhledem k podlahové ploše distriktu 44 720 m² je celková potřeba elektrické energie souboru budov 1 118 MWh. Jelikož pro další energetické bilancování jsou zapotřebí hodinové údaje byly využity normalizované typové diagramy dodávky. Obytné jednotky jsou plánované bez elektrického zdroje vytápění, a tedy pro výpočet byl použit typový diagram TDD₄ z roku 2019. Výsledky hodinových hodinového průběhu v souboru budov je na znázorněn na grafu 3.5.



Graf 3.5 Potřeba elektrické energie v souboru budov

Typové diagramy vznikají na základě vzorků odečtených z relativních 8760 hodnot za rok. Normalizovaný typový diagram je posloupnost relativních hodnot průměrných hodinových odběrů elektřiny vztažených k hodnotě ročního maxima průměrných hodinových odběrů příslušné skupiny konečných zákazníků definované třídou typového diagramu a přepočtených na normální klimatické podmínky. Diagramy pro kalendářní rok jsou dostupné pro konkrétní kategorie na portále OTE – operátor trhu s elektřinou a plynem. Pod pojmem „normalizované“ je myšleno, že hodnoty odpovídají normálním klimatickým podmínkám (teplotě). Jako normální teplota se bere průměrná teplota za 30 let. [26]

3.6. Bilance FV elektrárny

3.6.1. Postup výpočtu

Pro výpočet produkce fotovoltaické elektrárny byl použit výpočet, který zohledňuje hlavní ztráty FV systému. Výpočet zohledňuje vliv teploty FV článků a vliv úrovně ozáření v průběhu roku na účinnost modulů podle konkrétní technické specifikace vybraných FV modulů. Výpočet zohledňuje i elektrické ztráty na vedení a ztráty měniče a výpočet je rozpracován do hodinových dat na základě klimatických podmínek pro rok 2019. Jedná se o zjednodušenou bilanční metodu, která nepracuje s voltampérovou charakteristikou modulů, nicméně využívají se základní parametry jako je účinnost modulu η_{ref} [%], instalovaný špičkový výkon P_{pk} [kW] a činná plocha modulů A_{FV} [m²] a dále specifické parametry výrobce jako teplotní výkonový součinitel γ [%/K], jmenovitá provozní teplota článku NOCT2 [°C] a pokles účinnosti s poklesem slunečního ozáření $\Delta\eta_G$ [%]. Účinnost FV modulu se s rostoucí teplotou snižuje dle lineárního vztahu 3.24.

$$\eta_{FV,t} = \eta_{ref} * \left(1 + \frac{\gamma}{100} * (t_{FV} - t_{ref}) \right) \quad (3.15)$$

kde je

η_{ref} referenční účinnost [%] při normových zkušebních podmínkách (1000 W/m² a 25 °C),

t_{FV} teplota fotovoltaického článku [°C],

t_{ref} referenční teplota článku 25 °C,

G teplotní součinitel výkonu [%/K] pro daný modul.

² NOCT tzv. jmenovité provozní teploty článku NOCT. Tu udává výrobce pro definované provozní podmínky, odlišné od normových zkušebních: sluneční ozáření $G = 800 \text{ W/m}^2$, teplota okolního vzduchu $t_e = 20 \text{ °C}$, rychlost větru 1 m/s a stav bez odběru elektrické energie z FV článku (otevřený obvod).

Pro výpočet byl vybrán monokrystalický modul TOPHiKu6 od firmy CanadianSolar s parametry uvedenými v tabulce 3.9.

Fotovoltaický modul	η_{ref} [%]	γ [%/K]	NOCT [°C]	$\Delta\eta_G$ [%]
TOPHiKu6 CS	22,5	-0,29	41	-3

Tabulka 3.9 Parametry vybraného fotovoltaického panelu [28]

Při uvažování pohltivosti modulu $\alpha = 1 - \rho$, kde ρ je odrazivost modulu, která se pohybuje při kolmém úhlu dopadu na úrovni 5 %, je možné stanovit součinitel přestupu tepla z FV článku do okolí. [27]

$$U = \frac{0,95 * 800}{(NOCT - 20)} \quad (3.16)$$

kde je

NOCT teplota článku při podmínkách $G = 800 \text{ W/m}^2$ a teplotě venkovního vzduchu 20 °C.

Součinitel přestupu tepla zahrnuje vliv přestupu tepla sáláním a vliv přestupu tepla prouděním. Při zjednodušujícím předpokladu, že podmínky sálání a proudění se během roku příliš nemění, lze uvažovat součinitel U během roku konstantní a podle rovnice 3.17 je možné vypočítat pro každou hodinu střední teplotu FV článku při znalosti klimatických podmínek v daných hodinách.

$$t_{FV} = t_{e,s} + \frac{G_m}{800} (1 - \eta_{FV}/100) \cdot (NOCT - 20) \quad (3.17)$$

kde je

$t_{s,e}$ střední denní teplota venkovního vzduchu v době slunečního svitu [°C]

G_m střední sluneční ozáření [W/m²].

Účinnost monokrystalických FV modulů závisí také na úrovni slunečního ozáření G . Sklesajícím slunečním zářením se snižuje účinnost dle vztahu 3.18 [27]

$$\eta_{FV,G} = \eta_{ref} * \left(1 + k * \ln \frac{G}{G_{ref}} \right) \quad (3.18)$$

kde je

η_{ref} referenční účinnost [%] při normových zkušebních podmínkách

G sluneční ozáření pro stanovení poklesu účinnosti, zpravidla $G = 200 \text{ W/m}^2$

G_{ref} referenční ozáření $G_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$

k součinitel pro daný modul [-]. Lze vypočítat ze vztahu $\frac{\Delta\eta_G}{\ln(\frac{G}{G_{ref}})}$

Hodinovou výrobu FV elektrárny získáme následujícím vztahem

$$E_{FV,sys} = 0,9 * \frac{\eta_{FV}}{100} * H_S * A_{FV} \left(1 - \frac{p}{100}\right) \quad (3.19)$$

kde je,

H_S měsíční dávka slunečního ozáření [$\text{kWh/m}^2 \cdot \text{měs}$],

A_{FV} činná plocha instalovaných FV modulů [m^2],

η_{ref} referenční účinnost modulů [%],

p srážka vlivem elektrických ztrát [%]. Ztráty na DC vedení 2 %, ztráty na měniči a sledovači výkonového maxima 5 % a ztráty na AC vedení přibližně 1 %.

Optické ztráty vlivem nekolmého úhlu dopadu slunečního záření během roku na FV moduly jsou v rovnici zohledněny konstantou 0,9 odpovídající průměrné odrazivosti pro všesměrové záření. [27]

3.6.2. Návrh plochy fotovoltaické elektrárny

Pro distrikt se uvažovaly dvě varianty orientace fotovoltaických panelů. Jedna varianta uvažovala s orientací na jih a druhá s orientací východ/západ. Pro variantu s orientací na jih se uvažoval sklon panelů 35° a pro variantu východ/západ se uvažoval sklon panelů 15° . Celková plocha střech souboru budov je $13\,520 \text{ m}^2$. Plochy pokryté fotovoltaickými panely pro jednotlivé varianty jsou v tabulce 3.10.

	Plocha instalovaných modulů [m^2]
Varianta Jih	3 895
Varianta východ/západ	3272 / 3272

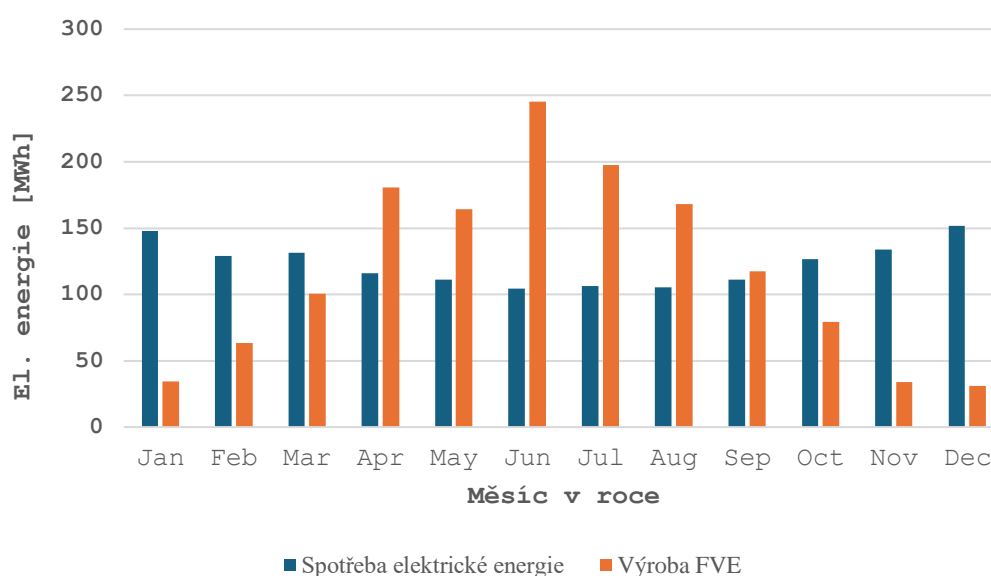
Tabulka 3.10 Plochy fotovoltaických panelů pro jednotlivé varianty

Velikost fotovoltaické elektrárny byla vypočtena z plochy střech celého souboru budov, od které byla odečtena plocha vyplývající z minimální vzdálenosti pokládání fotovoltaických panelů od okraje střechy 1 m a část plochy střech, na které nelze položit fotovoltaické panely, protože je na některých střechách plánovaná terasa a také při reálné výstavbě bude potřeba nechat na střeše místo pro výstup technických zařízení budovy. Návrh hromosvodů a konkrétních technologií v budově není znám, a proto není možné navrhnout konkrétní rozložení fotovoltaické elektrárny ovšem výpočet využitelné plochy pro fotovoltaickou elektrárnu dostatečně přesně simuluje velikost plochy, která by na elektrárnu mohla být využita a její špičkový výkon. Špičkový výkon fotovoltaické elektrárny pro obě varianty je uveden v tabulce 3.11.

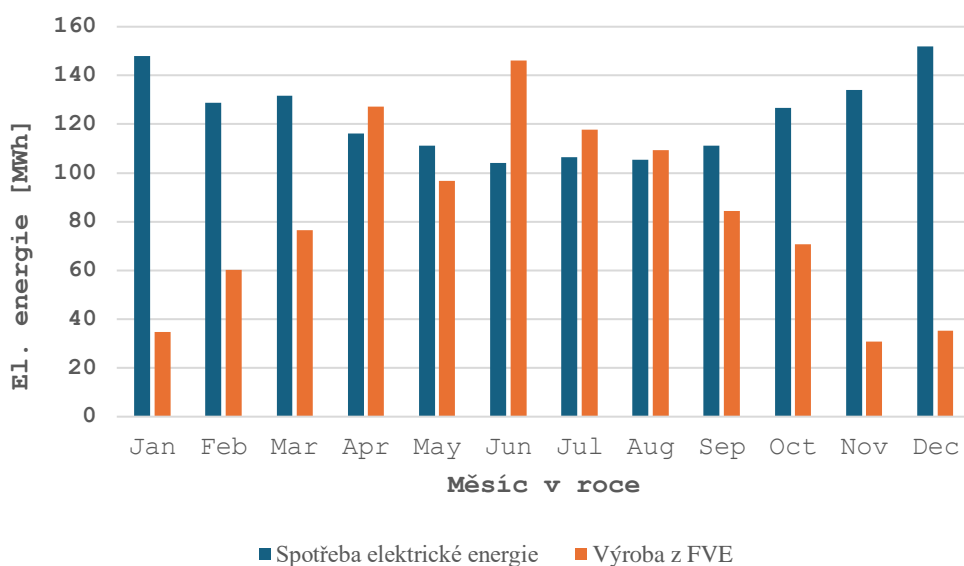
Tabulka 3.11 Špičkový výkon pro varianty fotovoltaické elektrárny.

Varianta	Špičkový výkon [kWp]
Jih	876
Východ/Západ	1 472

Měsíční spotřeba souboru budov, měsíční výroba a pokrytí fotovoltaické elektrárny pro jednotlivé měsíce pro variantu orientace fotovoltaických panelů na jih je vidět na grafu 3.6 a na grafu 3.7 lze vidět varianta s orientací východ/západ.

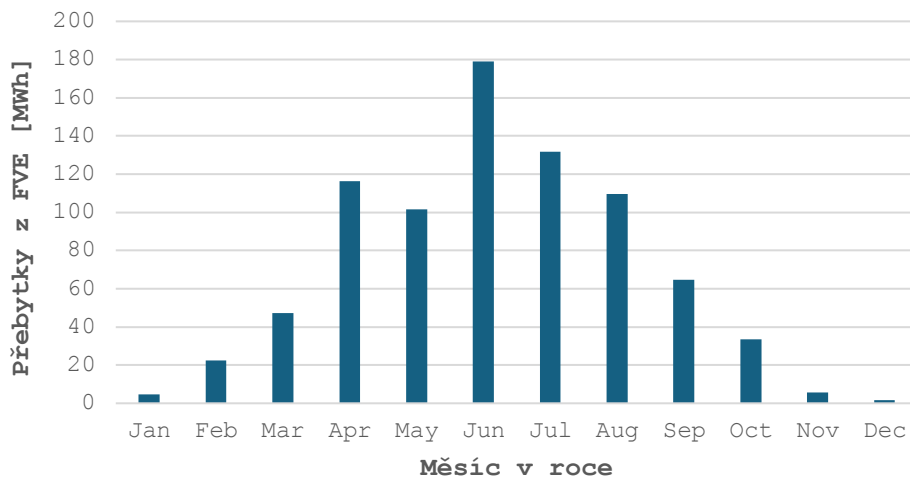


Graf 3.6 Měsíční bilance FVE systému orientace východ/západ

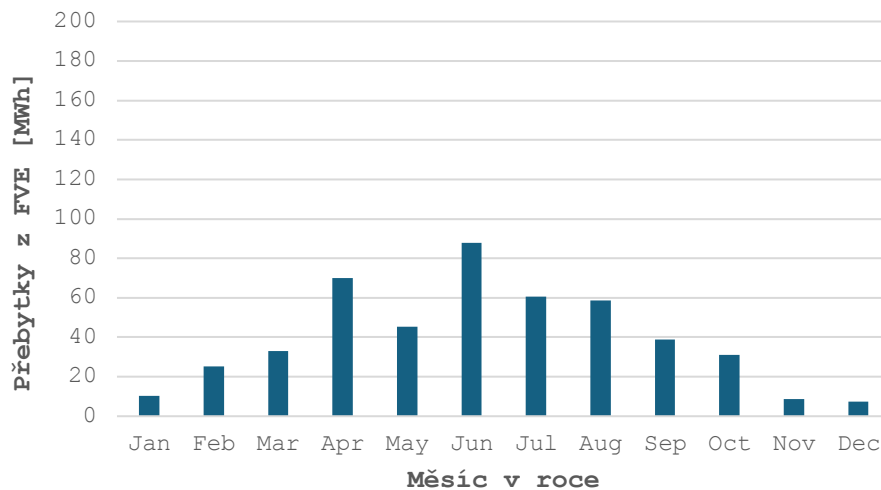


Graf 3.7 Měsíční bilance FVE systému orientace jih

Pro výrobu zeleného vodíku je potřeba obnovitelná energie, a tím jsou v souboru budov přebytky fotovoltaické elektrárny. Přebytky pro jednotlivé varianty lze vidět na grafech 3.8 a 3.9.



Graf 3.8 Velikost přebytků FVE s orientací východ/západ v jednotlivých měsících

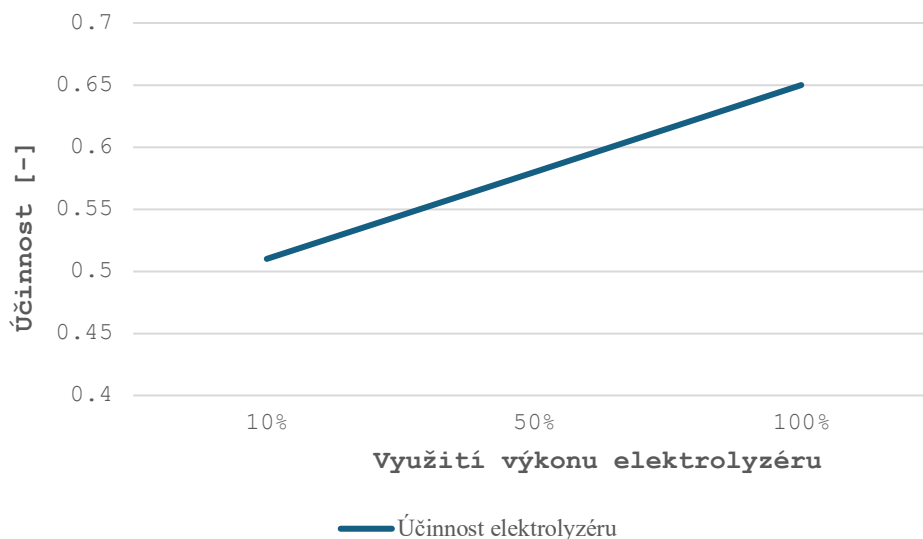


Graf 3.9 Velikost přebytků FVE s orientací jih v jednotlivých měsících

Z grafů 3.8 a 3.9 lze vidět, že větších přebytků dosahuje varianta s orientací výhod-západ. Z tohoto důvodu bude dále rozpracována pouze tato varianta, jakožto lepší pro využití vodíku v souboru budov, protože je možné využít více elektrické energie pro výrobu vodíku.

4. Vodíkové hospodářství

V této kapitole je spočtena výroba a spotřeba vodíku v souboru budov. Využití vodíku v je počítané pro variantu orientace fotovoltaické elektrárny východ-západ. Jako primární zdroj pro výrobu vodíku jsou využívány přebytky fotovoltaické elektrárny z vypočítané hodinové bilance v kapitole 3.6. Výroba vodíku je uvažována, když jsou k dispozici dostatečně velké přebytky na pokrytí 10 % jmenovitého výkonu elektrolyzérů a veškeré přebytky, které jsou nad 100 % jmenovitého výkonu elektrolyzérů zůstávají nevyužity a jsou poslány do sítě. Dále jsou rozebrány dva případy, kdy v prvním je využita levná elektřina na spotovém trhu, která je možná využít pro produkci vodíku a tím i více využít elektrolyzér. V druhém případě lze poskytnout elektrolyzér do služeb výkonové rovnováhy (SVR), kdy je elektrolyzér možné využít pro negativní regulaci, a tím zvýšit produkci vodíku, využití elektrolyzérů a také získat zisky za rezervaci a aktivaci podpůrných služeb. Detailněji jsou případy v práci dále rozebrány. Ve všech variantách je počítáno s proměnnou účinností elektrolyzérů na základě rozsahu výkonu elektrolyzérů, který se mění v návaznosti na výrobě fotovoltaické elektrárny. Údaje o účinnosti jsou převzaty od výrobce elektrolyzérů Nel. Závislost účinnosti elektrolyzérů na využití výkonu je na grafu 4.1. [17]

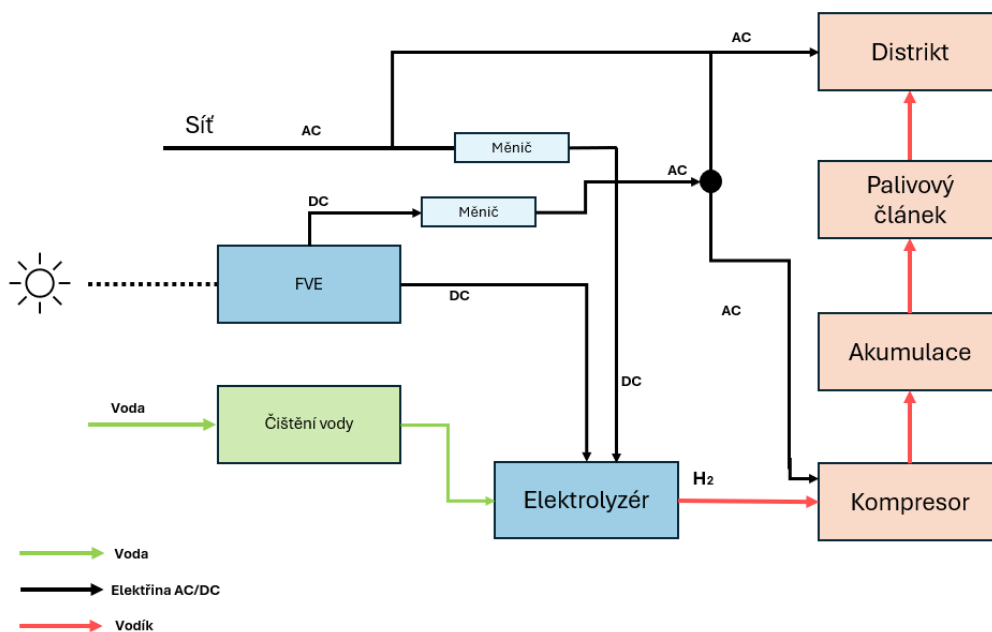


Graf 4.1 Závislost účinnosti elektrolyzérů na využití výkonu elektrolyzérů

Spotřeba vodíku probíhá v palivovém článku, jehož účinnost se pohybuje v rozmezí 45-58 % v závislosti na zatížení. Pro hodinové spotřeby vodíku jsem počítal s konstantní účinností 50 % pro produkci elektrické energie. Při výrobě elektrické energie jako vedlejší produkt vzniká teplo, při čemž má palivový článek výstupní teplotu 80°C. Teplo z článku můžeme v souboru budov také využít. Účinnost výroby tepla je 40 %. Údaje o účinnosti článku jsou převzaty od výrobce Power Cell Group. [33]

Pro způsob akumulace se nabízejí dvě možnosti akumulace a těmi jsou akumulace stlačeného vodíku v titanových nebo ocelových nádobách s tlakem 300 nebo 700 barů a skladování tekutého vodíku při teplotě okolo 21 K. Vodík v kapalném skupenství má vysokou hustotu a je možné ve stejném objemu nádrže uchovat více energie. Ovšem energetické náklady na dosažení takto nízké teploty jsou značné a tato metoda je spíše vhodná pro transport vodíku, ovšem ne pro residenční objekt. Pokud chceme využívat vodík pro zpětnou výrobu elektřiny je nutné uvažovat vodík v plynném skupenství, protože palivové články požadují jako zdroj plyn. V práci tedy uvažuji akumulaci stlačeného vodíku při tlaku 300 barů. Zásobníky na vodík se od sebe moc neliší a důležité parametry jsou velikost a potřeba energie na stlačení vodíku na požadovaný tlak. Ve výpočtech tedy uvažuji obecnou akumulaci, kdy mohu velikost akumulace měnit a potřeba na stlačení je 3kWh na stlačení jednoho kilogramu vodíku. [10],[30]

V systému pro vodíkové hospodářství jsou nejdůležitější komponenty elektrolyzér, palivový článek, a akumulace. Ovšem aby byl systém funkční je zapotřebí přidat další přídatné systémy jako je kompresor, čistič vody a měnič. Schéma systému je na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1 Návrh vodíkového systému

V každé z popsaných variant je vyhodnocena LCOE analýza pro kilogram vodíku a pro kWh využité energie z výroby palivového článku. Využitou energií se myslí elektrická i tepelná energie vyrobená palivovým článkem, která je využita v souboru budov. LCOE analýza říká za kolik je možné vyrobit 1 kilogram vodíku nebo 1 kWh energie vzhledem k investičním a variabilním nákladům v průběhu celé životnosti zařízení. LCOE je počítána podle vzorce:

$$LCOE = \frac{\text{Celkové náklady na systém v průběhu životnosti zařízení}}{\text{celková vyrobená energie}}$$

4.1. Varianta zelený vodík

Zelený vodík je vodík, který je získán pouze z obnovitelných zdrojů, a tedy pouze z přebytků FVE v souboru budov. Na výrobu vodíku jsou využity jen přebytky instalované fotovoltaické elektrárny. Z toho vyplývá, že produkce vodíku je kompletně závislá na slunečním svitu. Souhrn roční závislosti výroby vodíku na výrobě fotovoltaické elektrárny lze vidět na grafu 4.2. Pro variantu byly zvoleny parametry komponent uvedené v tabulce 4.1.

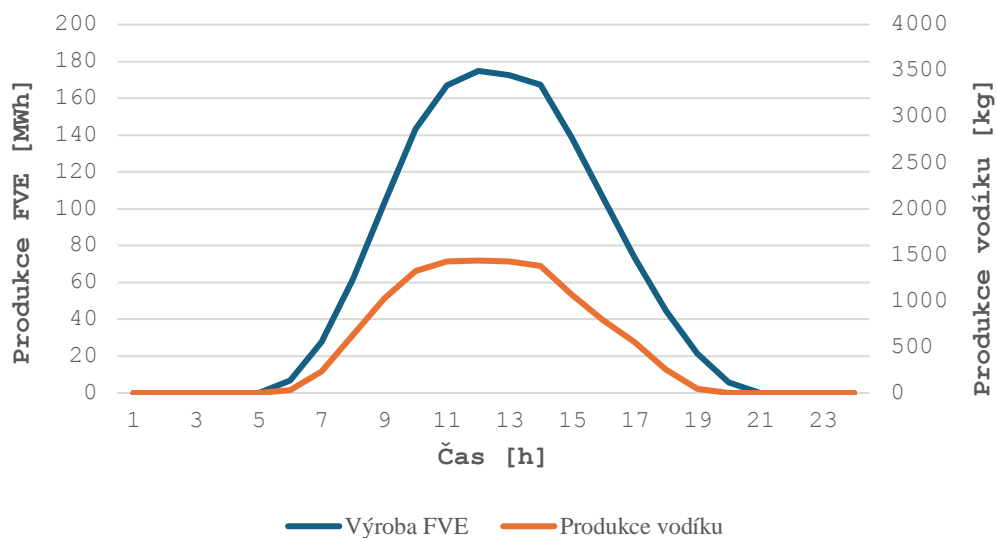
Tabulka 4.1 Parametry komponent systému na využití vodíku pro variantu zelený vodík

Výkon elektrolyzéry	400kW
Výkon palivového článku	150 kW
Objem akumulace	120 kg

Roční výsledky produkce pro variantu zelený vodík jsou uvedeny v tabulce 4.2.

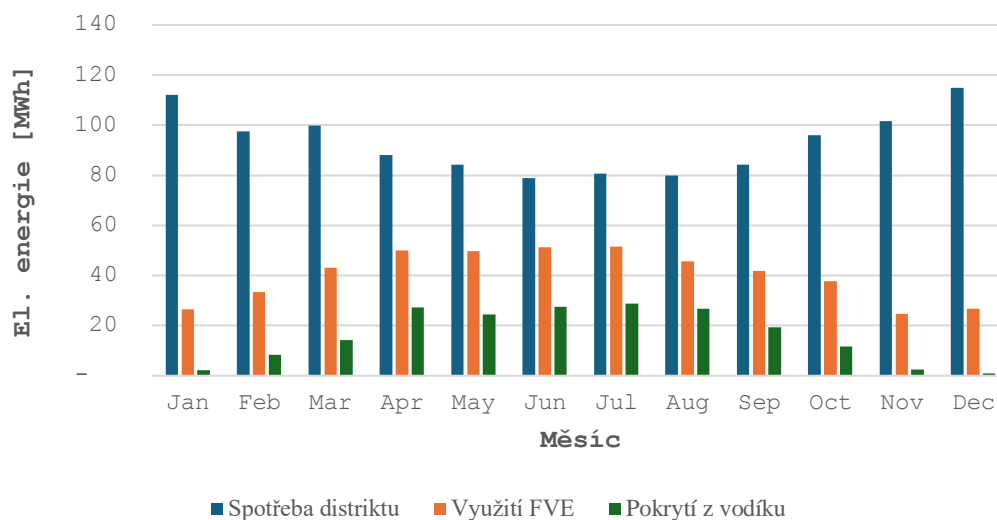
Tabulka 4.2 Výsledky roční produkce a využití pro variantu zelený vodík

Vyrobený vodík	12 777	kg
Pokrytá elektřina	17	%
Export elektřiny	275 527	kWh
Import elektřiny	446 672	kWh
Využití Elektrolyzéry	19	%
Dodaná elektřina	189 352	kWh
Pokrytí teplo	8	%
Dodané teplo	160 949	kWh
Přebytek tepla	0	%
Utilizace článku	20	%



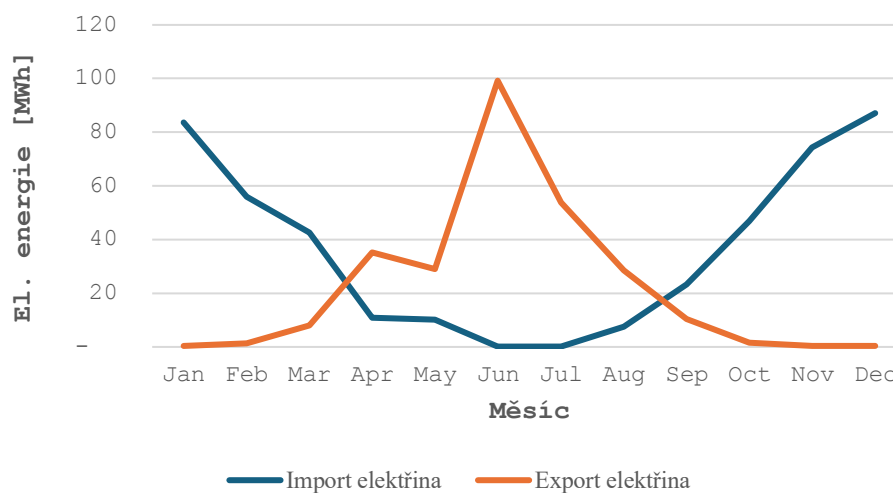
Graf 4.2 Výroba vodíku v průběhu dne pro variantu zelený vodík

Na grafu 4.3 lze vidět poměrné pokrytí elektrické energie FVE a výroby elektrické energie z vodíku pomocí palivového článku.



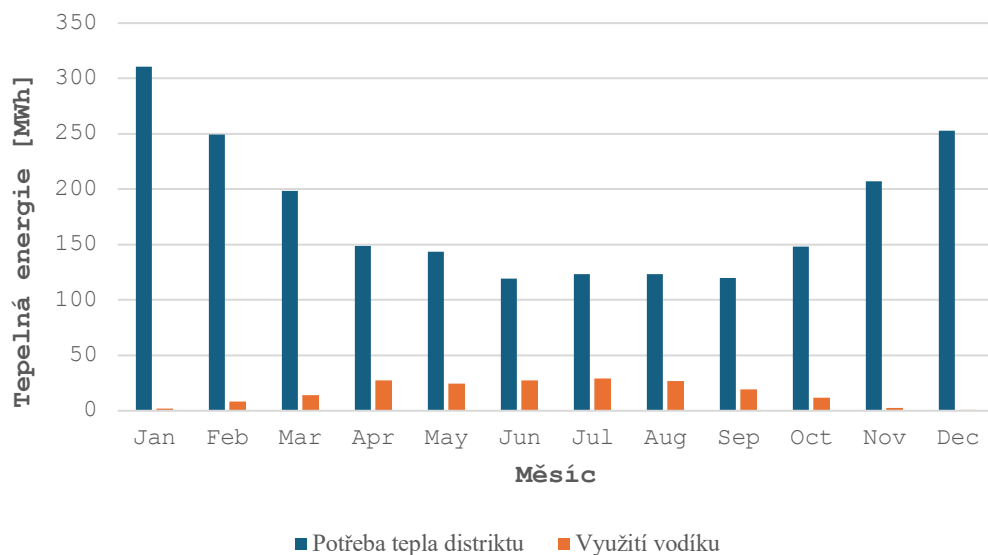
Graf 4.3 Využití vodíku pro pokrytí spotřeby elektrické energie pro varianta zelený vodík.

Graf 4.4 znázorňuje velikost importu elektřiny do souboru budov a exportované elektřiny ze souboru budov z důvodu nevyužití celých přebytků fotovoltaické elektrárny za jednotlivé měsíce.



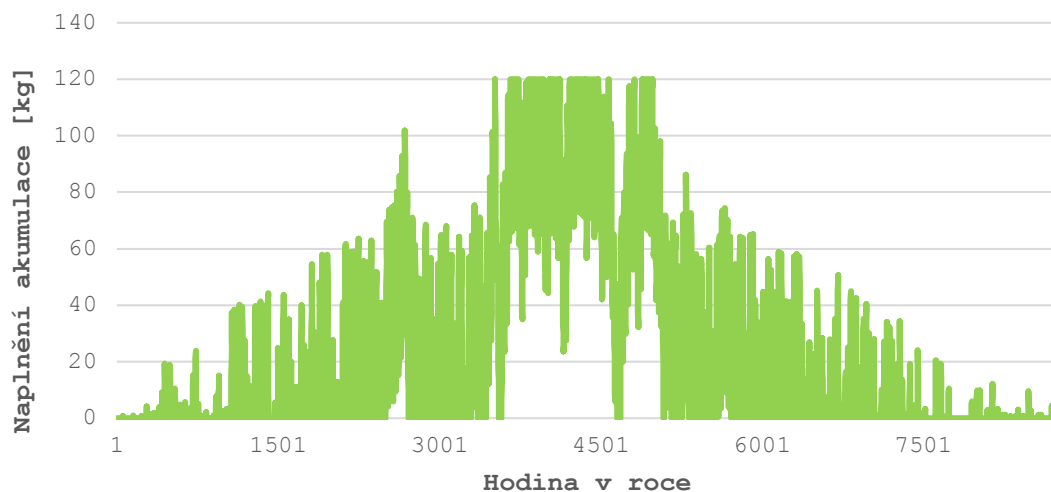
Graf 4.4 Graf export a importu elektrické energie pro variantu zelený vodík

Při výrobě elektrické energie palivový článek produkuje také teplo s popsanou účinností v úvodu této kapitoly, které je možné v souboru budov využít. Graf 4.5. znázorňuje, kolik tepla dokážeme pokrýt z vodíku výrobou palivovým článkem.



Graf 4.5 Pokrytí tepla z výroby palivového článku pro variantu zelený vodík

Průběh naplnění akumulace pro variantu zeleného vodíku v průběhu roku je znázorněn na grafu 4.6.



Graf 4.6 Průběh naplnění akumulace v průběhu roku pro variantu zelený vodík

Náklady na elektřinu počítají s cenou 1 kWh ze solární elektrárny 0,8 Kč/kWh. Náklady na výrobu kilogramu vodíku a na zpětnou výrobu kWh spočteny podle LCOE jsou uvedeny v tabulce 4.3. Cenou za kWh se myslí cena za využitou elektrickou i tepelnou energii dohromady v souboru budov. [3]

Tabulka 4.3 LCOE pro variantu zelený vodík

Zelený vodík		
Náklady na elektřinu	554 795	Kč/rok
Náklady na vodu	18 441	Kč/rok
Náklady na údržbu	510 400	Kč/rok
Náklady akumulace + komprese	3 058 000	Kč
Náklady Elektrolyzér	10 208 000	Kč
Náklady článek	5 865 000	Kč
LCOE	136,73	Kč/kg
Náklad na pokrytí kWh	5,21	Kč/kWh

4.2. Varianta šedý vodík

V druhé variantě se uvažuje k přebytkům fotovoltaické energie ještě využít levnou elektřinu na spotovém trhu, kterou lze potencionálně na výrobu vodíku dokoupit. Pro data o cenách v jednotlivých hodinách roku bylo využito dat z OTE. Data byla vzata za roky 2020 a 2022 a hodnoty byly v každé hodině zprůměrovány. Ve výpočtu je stanovena cena 80 EUR za megawatt hodinu, pod kterou se vyplatí elektřinu dokoupit a vyrobit vodík. Vzhledem k silné korelaci ceny elektřiny a denní doby, kdy vyrábí fotovoltaické elektrárny, je při výrobě vodíku upřednostňovaná výroba z přebytků fotovoltaické elektrárny distriktu, a tedy pokud fotovoltaická elektrárna vyrábí elektřinu, tak energie na trhu není dokupována. Elektřina je dokoupena, pokud je cena pod stanovenou hranicí a zároveň nejsou dostupné žádné přebytky z fotovoltaické elektrárny. Tato varianta umožňuje získat více energie na výrobu vodíku a lépe využít elektrolyzér, ovšem vyrobený vodík již nelze považovat za zelený vodík, protože je využita elektřina ze sítě, která je vázaná na energetický mix státu. Takový vodík už spadá do kategorie šedého vodíku, z čehož je také odvozen název této varianty. Parametry systému byly zvoleny dle tabulky 4.4.

Tabulka 4.4 Parametry komponent systému na využití vodíku pro variantu šedý vodík

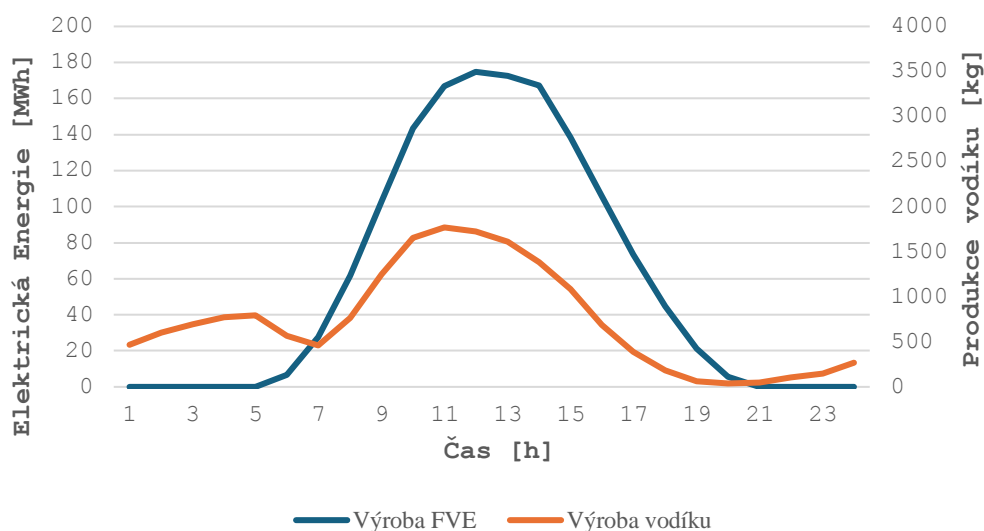
Výkon elektrolyzéro	500kW
Výkon palivového článku	150 kW
Objem akumulace	150 kg

Tabulka uvádí roční výsledky výroby a využití vodíku pro variantu šedého vodíku.

Tabulka 4.5 Výsledky roční produkce a využití pro variantu šedý vodík

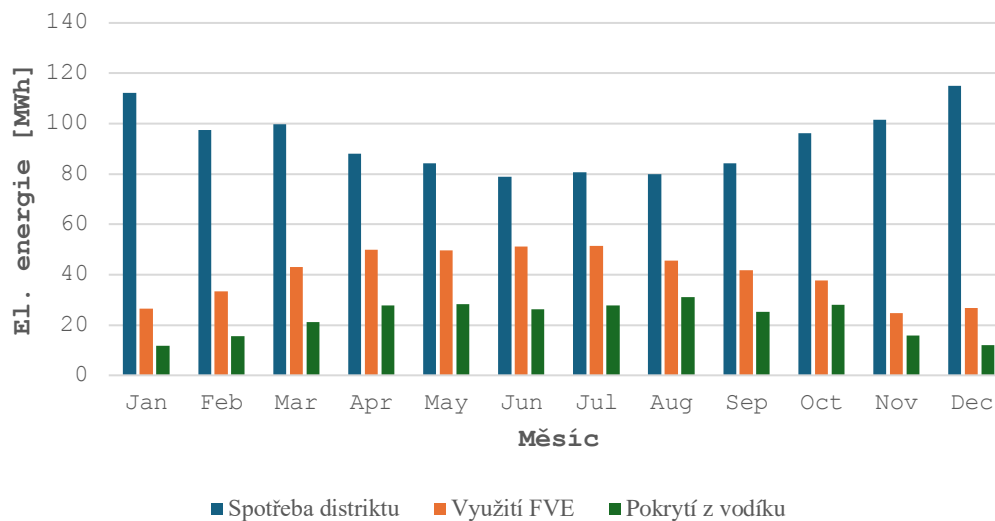
Vyrobený vodík	17 044	kg
Pokrytá elektřina	24	%
Export elektřiny	306 186	kWh
Import elektřiny	362 607	kWh
Využití Elektrolyzéro	20	%
Dodaná elektřina	273 417	kWh
Pokrytí teplo	11	%
Dodané teplo	232 405	kWh
Přebytek tepla	0	%
Utilizace článku	29	%

Průběh výroby během dne je znázorněn na grafu 4.7.



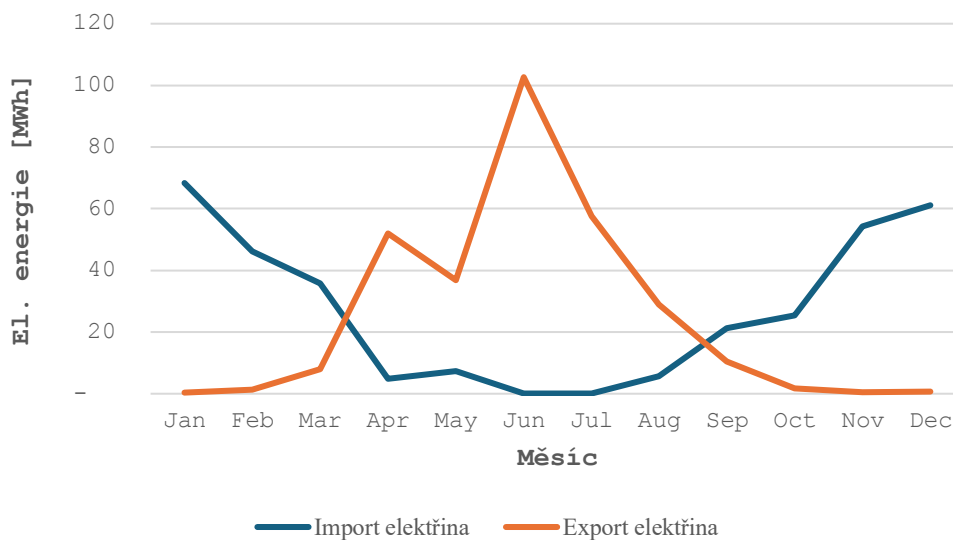
Graf 4.7 Výroba vodíku v průběhu dne varianta pro variantu šedý vodík

Graf 4.8 znázorňuje relativní pokrytí výroby energie z fotovoltaických elektráren (FVE) a energie z vodíku pomocí palivového článku v souboru budov.



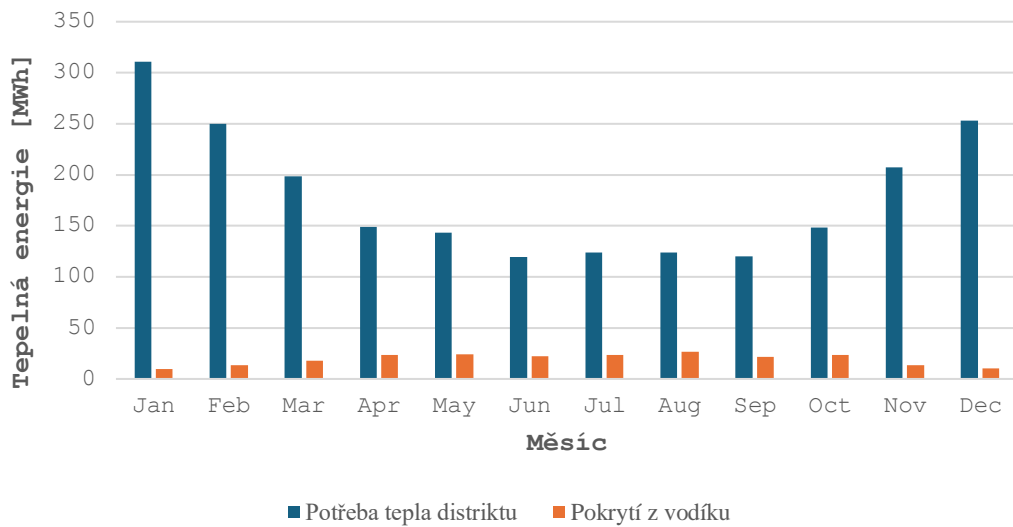
Graf 4.8 Využití vodíku pro pokrytí spotřeby elektrické energie pro variantu šedý vodík

Na grafu 4.9 je znázorněn průběh exportu elektřiny ze souboru budov a importu elektřiny do souboru obytných budov.



Graf 4.9 Graf exportu a importu elektrické energie pro variantu šedý vodík

Pokrytí tepelné energie je znázorněno na grafu 4.10.



Graf 4.10 Pokrytí tepla z výroby palivového článku pro variantu šedý vodík

Průběh naplnění akumulace pro variantu šedého vodíku je znázorněná na grafu 4.11.



Graf 4.11 Průběh naplnění akumulace v průběhu roku pro variantu šedý vodík

S využitím šedého vodíku je spočtena LCOE analýza dle parametrů v tabulce 4.6. Výsledky LCOE analýzy jsou uvedeny ve stejné tabulce. Náklady na elektřinu ze solárního zdroje jsou uvažovány 0,8 Kč/kWh a cena nakupované levné elektřiny je brána z průměrné ceny nakoupené elektřiny, pro kterou platí hranice 80 EUR. Cena kWh je cena využití elektrické i tepelné energie dohromady. [3]

Tabulka 4.6 LCOE pro variantu šedý vodík

Šedý vodík		
Náklady na elektřinu	843 593	Kč/rok
Náklady na vodu	24 300	Kč/rok
Náklady na údržbu	638 000	Kč/rok
Náklady akumulace + komprese	3 058 000	Kč
Náklady elektrolyzér	12 760 000	Kč
Náklady článek	5 865 000	Kč
LCOE	133,89	Kč/kg
Náklad na pokrytí kWh	5,05	Kč/kWh

4.3. Varianta SVR vodík

Spotřební zařízení typu elektrolyzér lze využít pro služby výkonové rovnováhy, které v případě potřeby balancují elektroenergetickou soustavu. Služby výkonové rovnováhy (SVR) spadají do kompetencí provozovatele přenosové soustavy, v České republice je to ČEPS a.s. Elektrolyzér vzhledem ke svému rychlému startu a vypnutí, které výrobci uvádí v rozmezí 100 až 400 sekund, je vhodný pro sekundární automatickou regulaci aFRR, což je služba, která je aktivována v situaci, kdy nabídka elektřiny převyšuje poptávku po elektřině a je potřeba elektřinu spotřebovat. [31]

Hlavní parametr pro poskytování podpůrné služby aFRR služby je náběhový čas zařízení, které musí do sedmi a půl minuty naběhnout na poskytovaný výkon. Tímto způsobem lze využít zařízení k balancování soustavy a také získat více energie na výrobu vodíku. Zároveň je možné za tuto službu získat finanční odměnu. Finanční odměny jsou dvojího typu. První odměnou je rezervační cena, která se platí za připravenost daného zařízení pro poskytování služby a poté aktivační cena, což je cena, která bude vyplacena. V případě záporné služby, za odebranou elektřinu ze sítě. Aktivační cenu je možné libovolně stanovit a poté ČEPS v případě potřeby bude aktivovat zařízení od nejnižší aktivační ceny, dokud nezíská potřebnou regulační energii. Tím padáme aktivační cena ovlivňuje pravděpodobnost aktivace. V našem případě, kdy chceme vyrobit, co nejvíce vodíku a co nejvíce využít elektrolyzér je na místě volit nižší aktivační cenu, ovšem takovou, aby mi alespoň pokryla náklady na projezd zařízení. Navrhované parametry pro variantu SVR jsou uvedeny v tabulce 4.7.

Tabulka 4.7 Parametry komponent systému na využití vodíku pro variantu SVR vodík

Výkon elektrolyzéro	500kW
Výkon palivového článku	150 kW
Objem akumulace	150 kg
Aktivační cena	80 EUR/MWh
Rezervační cena	13 EUR/MWh

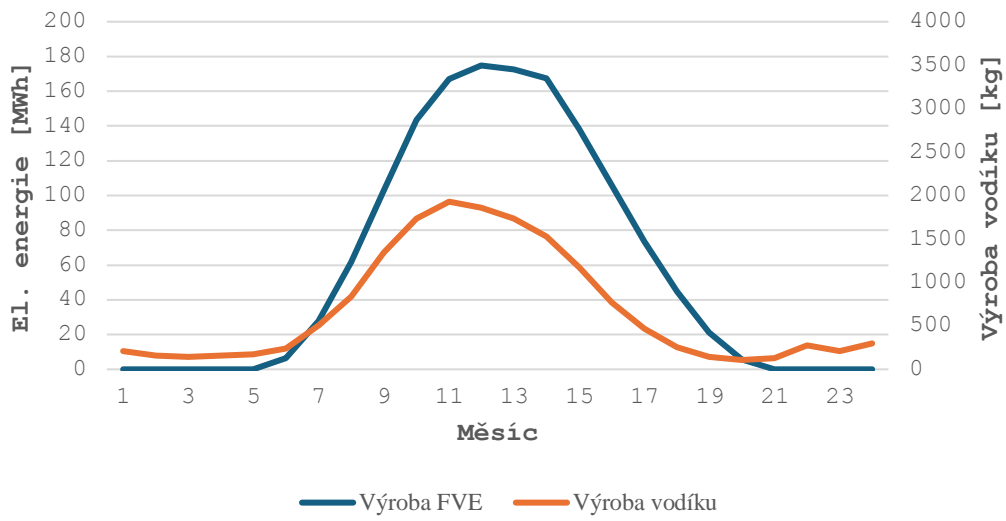
Limitem pro poskytování služeb SVR je poskytovaný výkon alespoň 1MW. Pro potřeby distriktu tak velký elektrolyzér nepotřebujeme. Ve výpočtových variantách uvažujeme elektrolyzér o výkonu 500 kW. Takovéto zařízení je ale také možné poskytnout do služeb SVR přes agregátora flexibility, který zařízení přidá do agregáčního bloku, který bude vyšší než 1MW. V tomto případě lze získat vyšší rezervační ceny z celodenních nabídek na druhou stranu v praxi si agregátoři účtují tak zvaný „profitshare“ což je poplatek za jeho služby. V praxi bývá výše profitsharu 20-30 % ze zisků, výtěžek z rezervačních a aktivačních cen. V práci pro tuto variantu uvažuji profitshare 20 % a polovinu výkonu elektrolyzéro za předpokladu, že má volnou kapacitu. Analýza pracuje s daty o aktivaci SVR od provozovatele přenosové soustavy ČEPS a.s. Pokud byl aktivován větší výkon než 40 MW, tak je aktivovaný i řešený elektrolyzér. Roční výsledky pro variantu SVR vodík jsou v tabulce 4.8.

Tabulka 4.8 Výsledky roční produkce a využití pro variantu SVR vodík

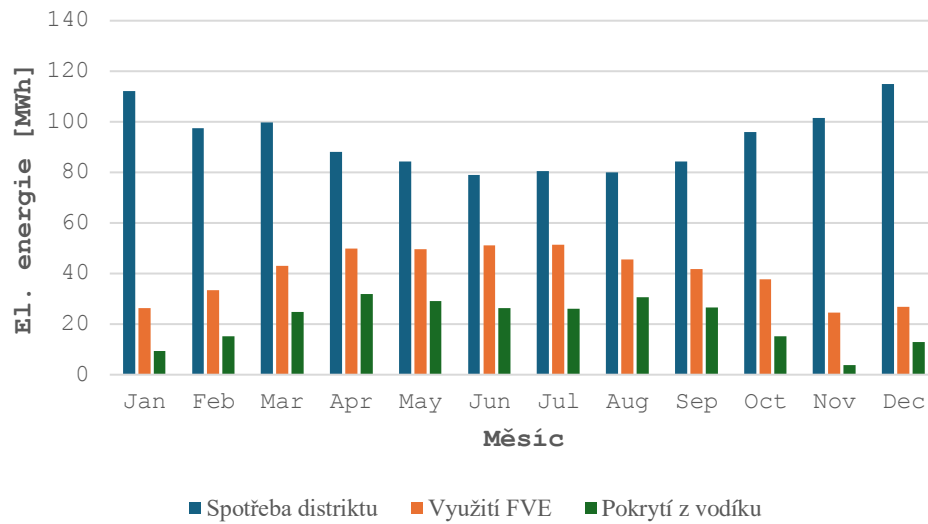
Vyroběný vodík	16 016	kg
Pokrytá elektřina	23	%
Export elektřiny	276 961	kWh
Import elektřiny	384 208	kWh
Využití elektrolyzéro	19	%
Dodaná elektřina	251 816	kWh
Pokrytí teplo	10	%
Dodané teplo	214 044	kWh
Přebytek tepla	0	%
Utilizace článku	28	%

Následují grafy ve stejném pořadí jako u předchozích variant na prvním grafu 4.12 je

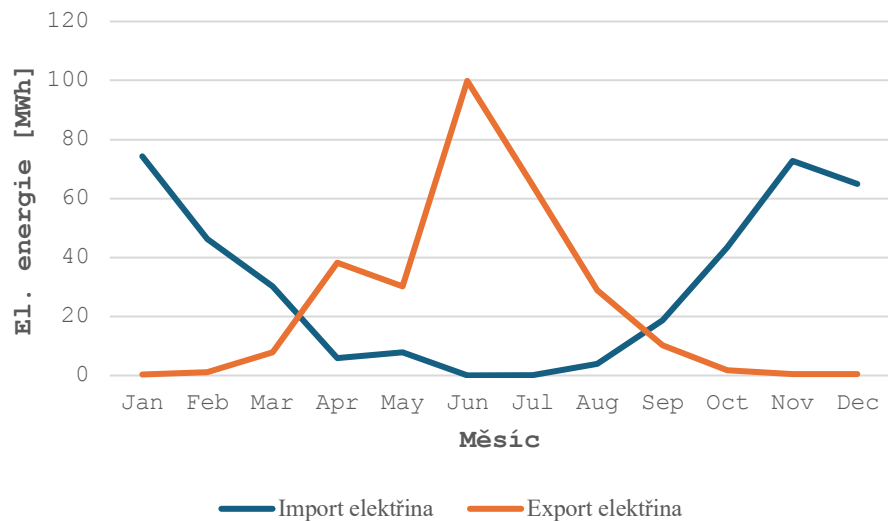
znázorněna produkce vodíku v průběhu dne a výroba fotovoltaické elektrárny.



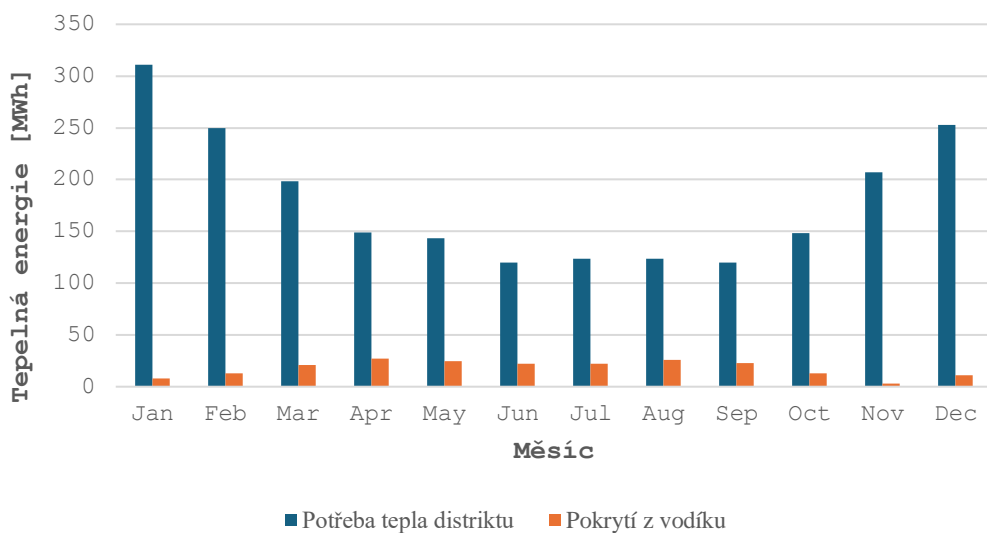
Graf 4.12 Výroba vodíku v průběhu dne pro variantu SVR



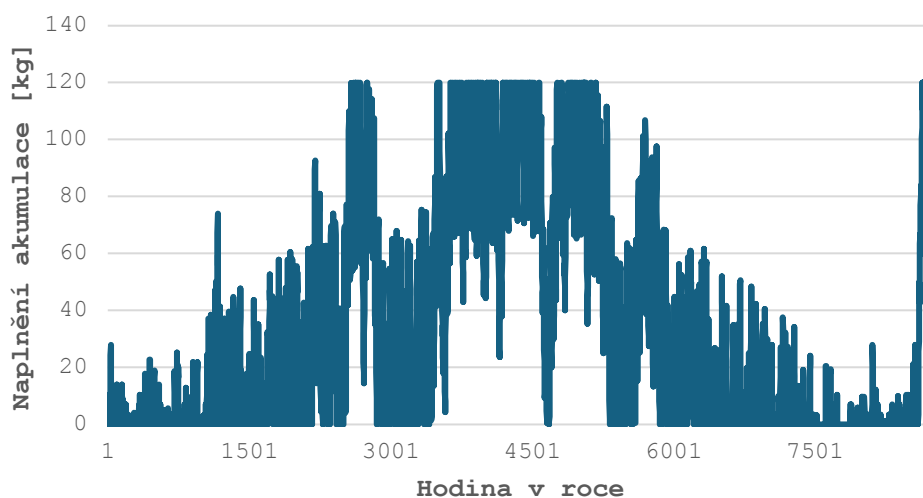
Graf 4.13 Využití vodíku pro pokrytí spotřeby elektrické energie pro variantu SVR



Graf 4.14 Graf export a importu elektrické energie pro variantu SVR



Graf 4.15 Pokrytí tepla z výroby palivového článku pro variantu SVR



Graf 4.16 Průběh naplnění akumulace v průběhu roku pro variantu šedý vodík

Pro variantu SVR, při které bylo využito energie z aktivace Pps, je spočtena LCOE analýza dle parametrů v tabulce 4.9. Výsledky LCOE analýzy jsou uvedeny ve stejné tabulce. Náklady na elektřinu ze solárního zdroje jsou uvažovány 0,8 Kč/kWh. Cena elektřiny využitě při aktivaci SVR je stanovena na 80 EUR/MWh. Navíc oproti předchozím variantám zde jsou i zisky z rezervačních a aktivačních cen pro Pps. Zisky z SVR jsou odečteny od ročních provozních nákladů a mají tedy vliv na celkovou cenu vyrobeného vodíku. Cena kWh je cena využitě elektrické i tepelné energie dohromady z výroby palivovým článkem. [3]

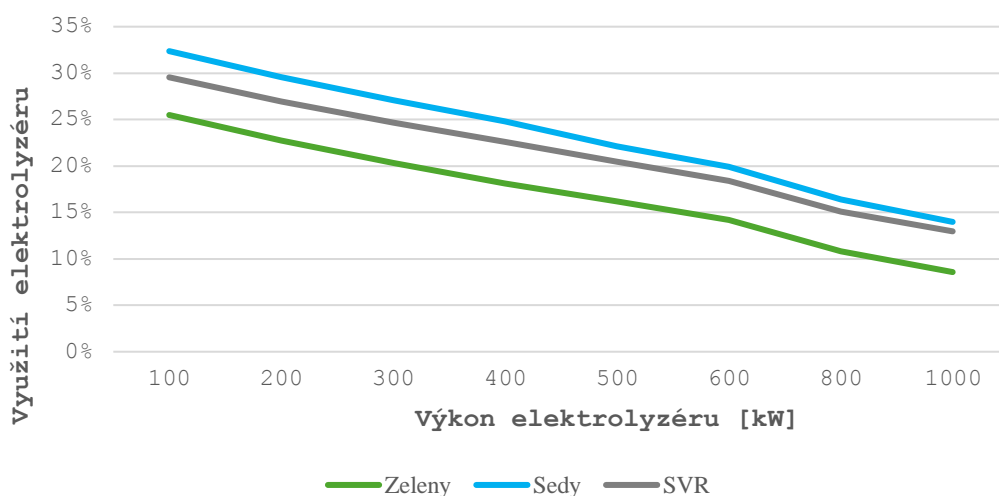
Tabulka 4.9 LCOE pro variantu SVR vodík

Šedý vodík		
Náklady na elektřinu	839 126	Kč/rok
Náklady na vodu	22 902	Kč/rok
Náklady na údržbu	638 000	Kč/rok
Náklady akumulace + komprese	3 058 000	Kč
Náklady elektrolyzér	12 760 000	Kč
Náklady článek	5 865 000	Kč
LCOE	110,12	Kč/kg
Náklad na pokrytí kWh	4,21	Kč/kWh

4.4. Dimenzování systému

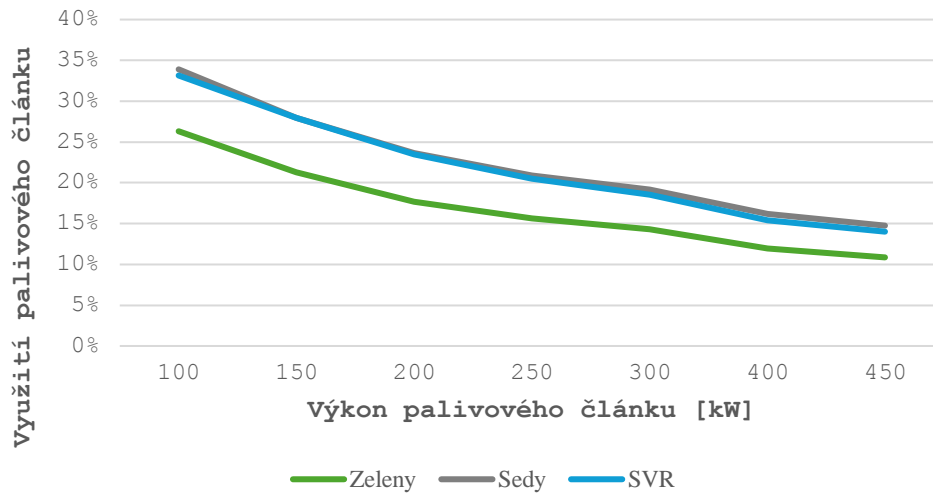
Z výpočtů v předešlých popsaných variantách vyplynuly závislosti dimenzování parametrů systému pro elektrolyzátor, palivový článěk a akumulaci. Parametry vyjmenovaných komponent ovlivňují využití vodíku. Navržené systémy v jednotlivých variantách byly navrženy na základě závislostí popsané v této kapitole.

Jak již bylo zmíněno, elektrolyzátor je možné provozovat v rozsahu výkonu 10-100 %, při čemž se mění účinnost, při které elektrolyzátor pracuje. Cílem je vyrobit, co nejvíce vodíku a využít k tomu, co nejvíce přebytků z FVE. Vzhledem k přebytkům lze dimenzovat elektrolyzátor. Předimenzovaný elektrolyzátor nevyužije veškeré přebytky FVE, které nestačí na pokrytí jeho výkonu alespoň 10 %. Větší elektrolyzátor může vyrobit více vodíku, ale je možné, že bude pracovat s nižší účinností v průběhu roku kvůli neúplnému vytížení výkonu. V grafu 4.17 je znázorněno, jak se mění využitelnost elektrolyzátoru s jeho výkonem pro navrhovaný soubor obytných budov. Využitím je myšlen poměr motohodin elektrolyzátoru a počtu hodin v roce.



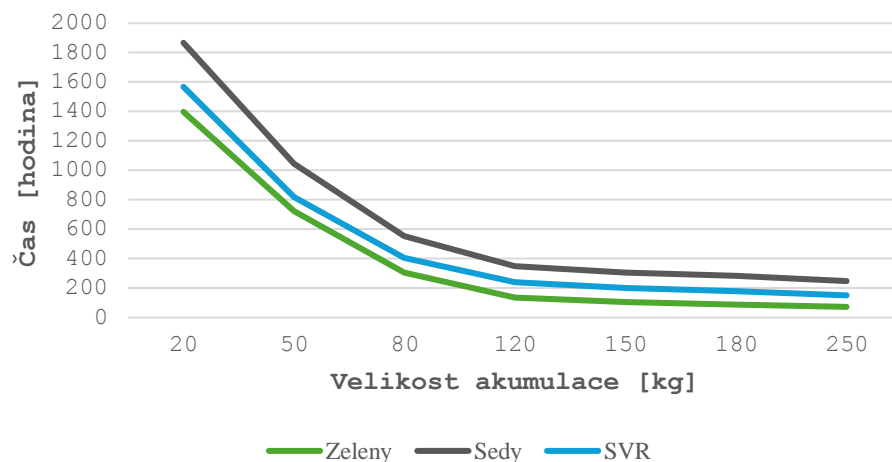
Graf 4.17 Závislost utilizace elektrolyzátoru na jeho velikosti

Dále je nutné vědět, jak velký je potřeba palivový článek, aby dokázal spotřebovat efektivně naakumulovaný vodík. Ve variantách šedý vodík a SVR je patrné, že palivový článek bude více vytěžován, a to je z toho důvodu, že je k dispozici více energie na výrobu vodíku, a tedy i samotná výroba vodíku je vyšší, tím pádem je možné více vodíku spotřebovat.



Graf 4.18 Závislost utilizace článku na jeho velikosti

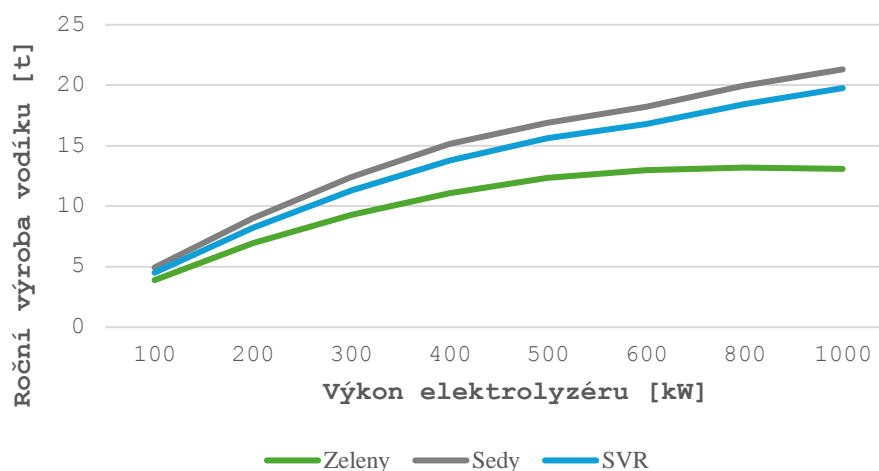
Třetím prvkem systému je akumulace, kterou je třeba dimenzovat tak, aby pokryla většinu výroby elektrolyzérů z přebytků energie. Pokud je akumulace moc malá a nelze akumulovat více vodíku, je nutné se vzdát přebytků z FVE a tento přebytek poslat do sítě. Naopak příliš velká akumulace bude mít vliv na pořizovací náklady, které jsou zbytečné. V grafu 4.19 lze vidět kolik hodin v roce je akumulace naplněná na 100 % vzhledem k její velikosti.



Graf 4.19 Utilizace akumulace v závislosti na její velikosti

Z výše uvedených grafů bylo vycházeno pro návrh systému souboru budov. Palivový článek je na dimenzování nejjednodušší. Můžeme ho dimenzovat vzhledem k maximální hodinové potřebě elektrické energie distriktu. Větší článek, než je maximální hodinová potřeba elektrické energie souboru budov je zbytečný, a tedy potřebujeme menší. Z grafu 4.18 můžeme zvolit efektivní palivový článek s výkonem 150 kW. Z grafu 4.19 byla volena akumulace v rozmezí 100-150 kg.

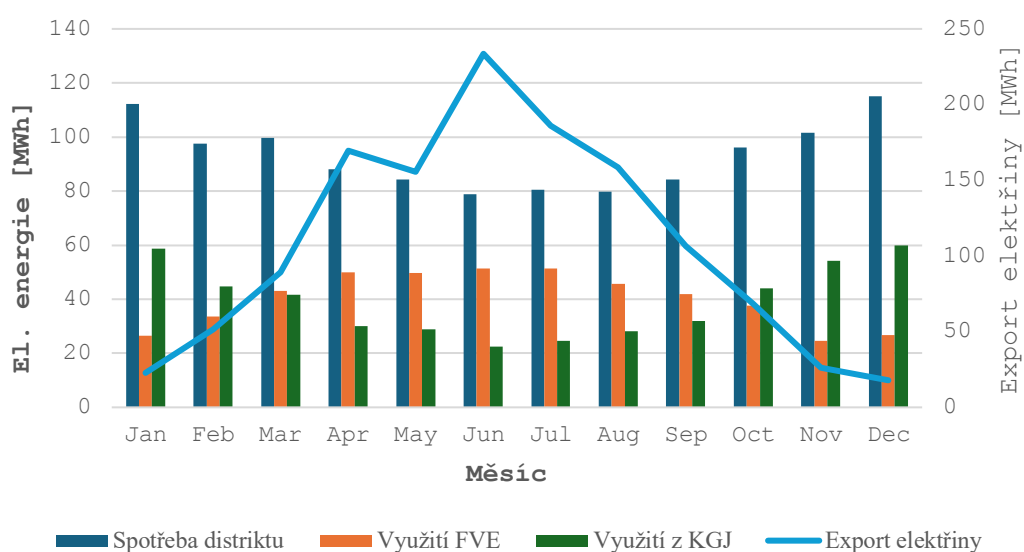
V návaznosti na vybrané parametry je možné provést analýzu, jak velikost elektrolyzáru vzhledem k vybraným parametrům bude ovlivňovat výrobu. Pro znázornění závislosti byl vybrán palivový článek o výkonu 150 kW a akumulace o velikosti 120 kg. Pro zelený vodík je limitem energie z přebytků. Pro ostatní scénáře lze využívat i energie z nákupu na trhu s elektřinou případně z aktivace PpS, které mohou být větší, a tudíž elektrolyzáru může být využíván k výrobě vodíku z těchto zdrojů. Ovšem práce je zaměřena na využití přebytků FVE v distriktu a zvýšená výroba v ostatních scénářích není předmětem této práce. Z grafu 4.20 je vidět, že vliv na výrobu zeleného vodíku má výkon elektrolyzáru zhruba do 500kW.



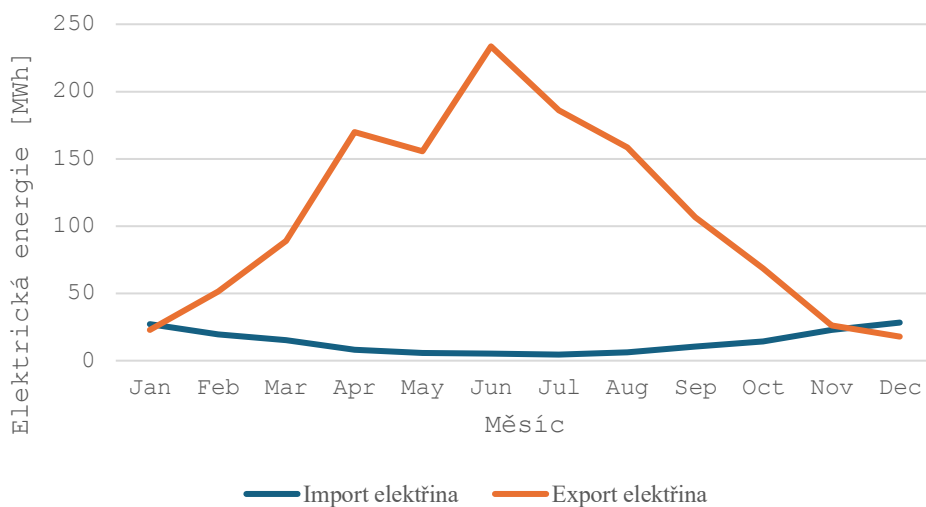
Graf 4.20 Vliv velikosti elektrolyzáru na výrobu vodíku

4.5. Varianta s kogenerační jednotkou

Pro porovnání je uvedena varianta s kogenerační jednotkou, která zajišťuje ekvivalentní tepelný výkon jako navrhovaný systém palivových článků. Kogenerační jednotka pracuje s plynem dodávaným ze sítě a její účinnost je stanovena na 90 %, jak je uvedeno v technickém listu výrobce. Cílem této analýzy je porovnat systém palivových článků poháněných vodíkem s konvenční kogenerační jednotkou a posoudit relativní výhody z hlediska účinnosti, udržitelnosti a celkového energetického výkonu.[22]

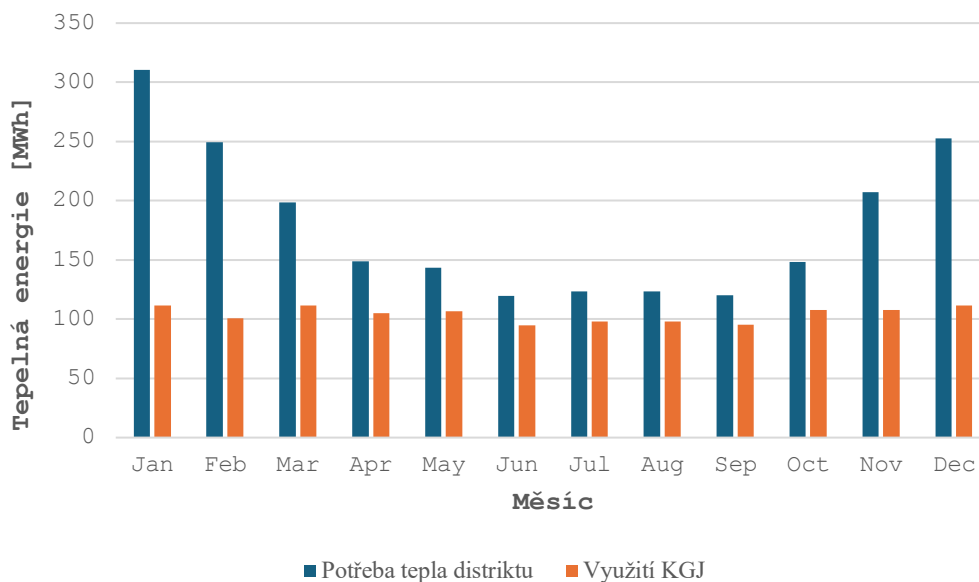


Graf 4.21 Pokrytí potřeby elektřiny kogenerační jednotkou



Graf 4.22 Průběh importu a exportu elektřiny pro variantu KGJ

Graf 4.23 znázorňuje pokrytí tepla souboru budov vyrobené kogenerační jednotkou. Je vidět, že dodávka tepla je stálá a je to dáno tím, že kogenerační jednotka má nepřetržitý přísun plynu a není závislá na produkci FVE, která se v průběhu dne i roku mění.



Graf 4.23 Pokrytí potřeby tepla varianta KGJ

Pro variantu s kogenerační jednotkou byla také spočtena LCOE analýza a výsledky jsou uvedeny v tabulce

Tabulka 4.10 LCOE pro variantu s využitím KGJ

KGJ		
Náklady na plyn	2 302 988	Kč/rok
Náklady na KGJ	3 321 000	Kč/rok
Náklady na údržbu	132 840	Kč/rok
Dodané teplo	1 248 608	kWh/rok
Dodaná elektřina	469 414	kWh/rok
Náklad na pokrytí kWh	1,51	Kč/kWh

4.6. Shrnutí výsledků

V tabulce 4.11 jsou údaje o roční výrobě vodíku pro každou řešenou variantu. Lze vidět, že pokud není nespoleháno pouze na přebytky fotovoltaické elektrárny a elektrolyzér je řízen dle řešených kritérií můžeme dosáhnout přibližně o 25 % větší produkce.

Tabulka 4.11 Výroba vodíku pro jednotlivé varianty

Scénář	Výroba vodíku [kg]	Cena vyrobeného vodíku [Kč/kg]
Zelený	12 772	136,73
Šedý	17 044	133,89
SVR	16 016	110,12

Podrobnější výsledky jednotlivých variant jsou v tabulce 4.13. S využitím systému akumulace do vodíku můžeme pokrýt 17-24 % celkové spotřeby souboru budov. Fotovoltaická elektrárna sama pokryje 43% potřeby elektrické energie v souboru budov. Dohromady fotovoltaická elektrárna s vodíkovým využitím pokryje 60 % roční spotřeby souboru budov. Hodnoty pro řešení pouze s FVE bez využití ukládání přebytků do vodíku jsou uvedeny v tabulce 4.12. Také je patrná ekonomická náročnost výroby vodíku. S využitím varianty nákupu elektřiny nebo poskytováním zařízení do SVR také snižujeme ekonomickou náročnost výroby vodíku. V druhé variantě je možné vyrobit vodík o 13 % levněji než při první variantě. Varianta SVR vychází ekonomicky nejlépe hlavně díky ziskům z poskytování podpůrných služeb. Při využití této varianty je možné vodík vyrábět o 20 % levněji oproti využití pouze zeleného vodíku.

Palivový článek také pokrývá část potřeby tepla, ovšem není to velká část hlavně z důvodu toho, že akumulace vodíku v zimním období, kdy je poptávka po teple nejvyšší nenabývá velkého množství a v tomto období nemůže konkurovat kogenerační jednotce, která má nepřetržitý přísun plynu. Na druhou stranu kogenerační jednotka zavíní velké přetoky elektrické energie v letních měsících.

Tabulka 4.12 Hodnoty pro variantu pouze s využitím FVE

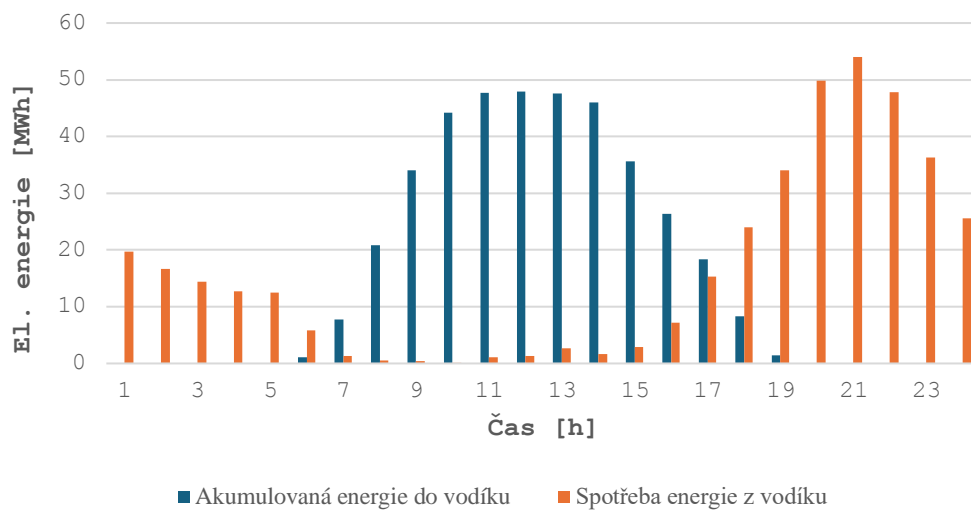
Pokrytí elektřiny [kWh]	481 976
Pokrytí elektřiny [%]	43
Export elektřiny [kWh]	930 971
Import elektřiny [kWh]	636 024

Tabulka 4.13 Výsledky jednotlivých variant

	Zelený	Šedý	SVR	KGJ
Výroba vodíku [kg]	12 772	17 044	16 016	-
Pokrytí elektřiny	17 %	24 %	23 %	42 %
Export elektřiny [kWh]	275 527	306 186	276 961	1 285 638
Import elektřiny [kWh]	446 672	362 607	384 208	166 610
Využití Elektrolyzéro	19 %	20 %	19 %	-
Dodaná elektřina z vodíku [kWh]	189 352	273 417	251 816	469 414
Pokrytí teplo	8 %	11 %	10 %	58 %
Pokryté teplo [kWh]	160 949	232 405	214 044	1 248 608
Přebytek tepla	0 %	0 %	0 %	0
Utilizace pal. článku	20 %	29 %	28 %	-

Vodík je akumulován především v období, kdy fotovoltaická elektrárna vyrábí elektřinu

a poskytuje přebytky, což z pravidla bývá v odpoledních hodinách. Akumulovanou energii je pak výhodné spotřebovávat v hodinách, kdy není dostupná solární energie. Velikost navržené solární elektrárny neumožňuje tak velké přebytky, aby bylo možné akumulovat tak velké množství vodíku, které by mohlo sloužit pro sezónní akumulaci. Vodík je tedy spotřebován v rámci nočních hodin a potřeba souboru budov ve většině případů vyprázdní celou akumulaci během jednoho dne. Průběh roční spotřeby energie ve vodíku v jednotlivých denních hodinách je znázorněn na grafu 4.24.



Graf 4.24 Průběh spotřeby vodíku v průběhu dne.

5. Závěr

V práci byla spočtena energetická bilance navrhované obytné čtvrti v Dolních Počernicích na základě, které byl vytvořen model řešící kolik je v lokalitě možné vyrobit a spotřebovat vodíku. Analyzovány byly tři varianty výroby vodíku – první varianta, kdy je vodík vyráběn pouze z přebytků fotovoltaické elektrárny, druhá varianta, která k přebytkům fotovoltaické elektrárny využívá také nákup levné elektřiny na spotovém trhu, když není elektrolyzér využíván a třetí varianta, která využívá k výrobě vodíku společně s přebytky fotovoltaické elektrárny také energii z aktivací z podpůrných služeb. Poslední varianta také přináší zisky navíc.

Z porovnání jednotlivých variant je ukázáno, že druhá a třetí varianta, kdy je elektrolyzér aktivně řízen zvyšují produkci vodíku a snižují ekonomickou náročnost produkce vodíku. Variantou šedý vodík je možné vyrobit vodík o 13 % levněji a s variantou SVR je možné vodík vyrobit o 20 % levněji. Obě varianty jsou také schopné pokrýt více potřeby energie souboru budov a to o 7 % a 6 %. Při výrobě vodíku je tedy nutné zvážit možnost, jestli neobětovat čistě zelený vodík za vodík šedý, který je ovšem vyráběný v časech přebytku elektřiny, jejíž využití je žádoucí. Varianty využití vodíku jsou ale stále ekonomicky nekonkurenceschopné vzhledem k variantě využití kogenerační jednotky. Tento fakt je dán především nepoměrem výroby, kdy výroba vodíku je silně spojena s výrobou fotovoltaické elektrárny, zatímco kogenerační jednotka má neomezený přísun plynu po dobu celého roku. Jediný problém s kogenerační jednotkou je ten, že produkuje velké přebytky elektrické energie v letních měsících.

V práci bylo zjištěno, že přebytky fotovoltaické elektrárny umístěné na střechy souboru budov nestačí pro sezónní akumulaci vodíku a vodík je spotřebováván maximálně v rámci několika dnů, a to v letních měsících. V zimních měsících vodík nedokáže pokrýt většinu potřeby energie souboru budov. Z tohoto zjištění bych navrhoval analýzu varianty pro bateriové úložiště v souboru budov.

Seznam použité literatury

- [1] JOLLY, William Lee. Hydrogen- chemical element. Online. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/hydrogen>. [cit. 2024-05-20].
- [2] Cost-competitive green hydrogen: how to lower the cost of electrolyzers? Oxford Institute for Energy Studies, 2022. ISBN ISBN 978-1-78467-193-8.
- [3] 2023 Levelized Cost Of Energy+. Online. [HTTPS://WWW.LAZARD.COM/Lazard](https://www.lazard.com/research-insights/2023-levelized-cost-of-energyplus/). 2023. Dostupné z: <https://www.lazard.com/research-insights/2023-levelized-cost-of-energyplus/>. [cit. 2024-05-10].
- [4] IEA. Global hydrogen demand by sector in the Net Zero Scenario, 2020-2030. Online. [HTTPS://WWW.IEA.ORG/](https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-hydrogen-demand-by-sector-in-the-net-zero-scenario-2020-2030). 2021. Dostupné z: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-hydrogen-demand-by-sector-in-the-net-zero-scenario-2020-2030>. [cit. 2024-05-10].
- [5] Making the breakthrough: Green hydrogen policies and technology costs. Online. IRENA, 2021. ISBN ISBN 978-92-9260-314-4. Dostupné z: <https://www.irena.org/publications>. [cit. 2024-05-10].
- [6] Vodík v energetice. Online. Dostupné z: <https://faktaoklimatu.cz/studie/2024-reserse-vodik>. [cit. 2024-05-10].
- [7] SCHELLING, Kamala. Green Hydrogen to Undercut Gray Sibling by End of Decade. Online. BloomerNEF. 2023. Dostupné z: <https://about.bnef.com/blog/green-hydrogen-to-undercut-gray-sibling-by-end-of-decade/>. [cit. 2024-05-05].
- [8] SCOTT, Keith. Electrochemical Methods for Hydrogen Production. Online. ECCCE Environmental eBooks 1968-2022, 2019. ISBN 978-1-78801-604-9. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1039/9781788016049-00001>. [cit. 2024-05-20].
- [9] Chemie prvků. Praha: Informatorium, 1993. ISBN 80-85427-38-9.
- [10] SEDDON, Duncan. The hydrogen economy. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte., 2022. ISBN 978-981-124-854-2.
- [11] Elektrolýza a její aplikace. Online. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/2285>. [cit. 2024-05-03].
- [12] Hydrogen Production: Electrolysis. Online. Energy.gov. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis>. [cit. 2024-05-10].
- [13] An Optimized Balance of Plant for a Medium-Size PEM Electrolyzer: Design, Control and Physical Implementation. Online. 2020. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/electronics9050871>. [cit. 2024-05-10].
- [14] A comprehensive review on PEM water electrolysis. Online. 2013. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.151>. [cit. 2024-05-10].
- [15] ČESKÁ VODÍKOVÁ TECHNOLOGICKÁ PLATFORMA. Česká vodíková technologická platforma. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/o-vodiku/ve-zkratce>. [cit. 2024-05-09].

- [16] Dynamic operation of water electrolyzers: A review for applications in photovoltaic systems integration. Online. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113407>. [cit. 2024-05-20].
- [17] NELHYDROGEN. NelHydrogen. Online. 2022. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/o-vodiku/ve-zkratce>. [cit. 2024-05-09].
- [18] LETTENMEIER, Dr. Philipp. Efficiency – Electrolysis White paper. Online. Dostupné z: <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/publications/whitepaper/download-electrolysis-white-paper.html>. [cit. 2024-05-10].
- [19] PORŠ, Ing. Zdeněk. Palivové články. Online. Ústav Jaderného Výzkumu Řež, a.s. Divize jaderné bezpečnosti a energetiky, 2002. Dostupné z: <https://docplayer.cz/376545-Ustav-jaderneho-vyzkumu-rez-a-s-divize-jaderne-bezpecnosti-a-energetiky-palivove-clanky-ing-zdenek-pors.html>. [cit. 2024-05-20].
- [20] DEVINN. Palivový článek. Online. Devinn.cz. Dostupné z: <https://www.devinn.cz/blog/palivovy-clanek>. [cit. 2024-05-10].
- [21] FUELCELLSWORKS. Proton Exchange Membrane Fuel Cell. Online. Dostupné z: <https://fuelcellsworks.com/knowledge/technologies/pemfc/>. [cit. 2024-05-20].
- [22] TEDOM. Kogenerace. Online. Dostupné z: <https://www.tedom.com/cs/kategorie/kogenerace-kogeneracni-jednotky/>. [cit. 2024-05-10].
- [23] PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM. PVGIS. Online. Dostupné z: <https://www.tedom.com/cs/kategorie/kogenerace-kogeneracni-jednotky/>. [cit. 2024-05-10].
- [24] AMILLO, A.M., Gracia; N., Taylor a E.D., Dunlop. SARAH-2 Solar Radiation Data. Online. 2021. Dostupné z: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis/pvgis-data-download/sarah-2-solar-radiation-data_en. [cit. 2024-05-10].
- [25] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN ISO 13790, Energetická náročnost budov – Výpočet spotřeby energie na vytápění a chlazení. 2009.
- [26] OTE, A.S. Normalizované TDD. Online. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/typove-diagramy-dodavek-elektriny/normalizovane-tdd?date=2024-05-20>. [cit. 2024-05-20].
- [27] MATUŠKA, DOC.ING. PH.D., Tomáš. Zjednodušený bilanční výpočet ročních přínosů fotovoltaických instalací. Online. 2015. [cit. 2024-05-20].
- [28] CANADIANSOLAR. Online. Dostupné z: https://www.solso1.cz/sites/default/files/data-sheets/cs-datasheet-tophiku6-topcon_cs6w-t_v1.6_cz_solso1_vz_5.pdf. [cit. 2024-05-20].
- [29] BLOOMENERGY HYDROGEN FUEL CELL. Technický list. Online. Dostupné z: <https://www.bloomenergy.com/wp-content/uploads/hydrogen-data-sheet.pdf>. [cit. 2024-05-20].
- [30] ENERGY.GOV. Hydrogen program. Online. 2022. Dostupné z: <https://www.hydrogen.energy.gov/>. [cit. 2024-05-10].

- [31] ENAPTER. Technický list. Online. Dostupné z: https://handbook.enapter.com/electrolyser/aem_nexus/downloads/Enapter_Datasheet_AEM-Nexus-1000.pdf. [cit. 2024-05-10].
- [32] Global Hydrogen Review 2023 IEA. Online. IEA, 2023. Dostupné z: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ecdfc3bb-d212-4a4c-9ff7-6ce5b1e19cef/GlobalHydrogenReview2023.pdf>. [cit. 2024-05-20].
- [33] ČSN EN 12831-3, Energetická náročnost budov – Výpočet tepelného výkonu - Část 3: Tepelný výkon pro soustavy přípravy teplé vody a charakteristika potřeb, Modul M8-2, M8-3. 2018.
- [33] POWERCELLGROUP. Power Generation System 100. Online. Dostupné z: <https://powercellgroup.com/product/power-generation-system-100/>. [cit. 2024-05-13].
- [34] ROUWENHORST, Kevin. Power Generation System 100. Online. 2023. Dostupné z: <https://ammoniaenergy.org/articles/technology-status-anion-exchange-membrane-aem-electrolysis/>. [cit. 2024-05-13].
- [35] TOPTITECHS. How is the generated water controlled in proton exchange membrane fuel cells. Online. 2023. Dostupné z: <https://ammoniaenergy.org/articles/technology-status-anion-exchange-membrane-aem-electrolysis/>. [cit. 2024-05-13].
- [36] ZARGARY, Shelli. AFC vs PEM. Online. 2018. Dostupné z: <https://www.gencellenergy.com/resources/blog/afc-vs-pem/>. [cit. 2024-05-13].

Seznam obrázků

Obrázek 2.1 Schéma procesu elektrolýzy [10]	15
Obrázek 2.2 Popis částí alkalického elektrolyzérů [16]	18
Obrázek 2.3 Popis částí elektrolyzérů s proton-výměnnou membránou [17].....	20
Obrázek 2.4 Schéma procesu alkalického palivového článku [21].....	28
Obrázek 2.4 Schéma procesu palivového článku PEMFC [35].....	29
Obrázek 3.1 Typový dům BD1 – pohled zepředu.....	31
Obrázek 3.2 Typový dům BD1 – pohled z boku	32
Obrázek 3.3 Typový dům BD3 – pohled zepředu.....	32
Obrázek 3.4 Typový dům BD3 – pohled zepředu.....	32
Obrázek 3.5 Situace obytné čtvrti	33
Obrázek 4.1 Návrh vodíkového systému.....	52

Seznam tabulek

Tabulka 2.1 Základní informace o vodíku [1]	12
Tabulka 2.2 Porovnání základních parametrů jednotlivých elektrolyzérů [4],[10]	21
Tabulka 2.3 Souhrn plánovaných parametrů pro jednotlivé typy elektrolyzérů do roka 2050 [5].....	23
Tabulka 3.1 Základní parametry typů budov.....	31
Tabulka 3.2 Úhrn dopadlé sluneční energie na dopadající plochu	34
Tabulka 3.3 Tepelně technické vlastnosti.....	35
Tabulka 3.4 Tabulka s výsledky potřeby tepla pro dům BD1 – sever/jih	39
Tabulka 3.5 Výsledky roční potřeby tepla na vytápění pro typové domy.....	39
Tabulka 3.6 Měrné jednotky pro výpočet potřeby tepla pro soubor budov	40

Tabulka 3.7 Hodnoty pro výpočet tepla na přípravu teplé vody.....	41
Tabulka 3.8 Denní příprava tepla na přípravu teplé vody pro typové domy.	42
Tabulka 3.9 Parametry vybraného fotovoltaického panelu [28].....	45
Tabulka 3.10 Plochy fotovoltaických panelů pro jednotlivé varianty	46
Tabulka 3.11 Špičkový výkon pro varianty fotovoltaické elektrárny.	47
Tabulka 4.1 Parametry komponent systému na využití vodíku pro variantu zelený vodík	53
Tabulka 4.2 Výsledky roční produkce a využití pro variantu zelený vodík.....	53
Tabulka 4.3 LCOE pro variantu zelený vodík	56
Tabulka 4.4 Parametry komponent systému na využití vodíku pro variantu šedý vodík.....	57
Tabulka 4.5 Výsledky roční produkce a využití pro variantu šedý vodík.....	57
Tabulka 4.6 LCOE pro variantu šedý vodík	60
Tabulka 4.7 Parametry komponent systému na využití vodíku pro variantu SVR vodík	61
Tabulka 4.8 Výsledky roční produkce a využití pro variantu SVR vodík	61
Tabulka 4.9 LCOE pro variantu SVR vodík.....	64
Tabulka 4.10 LCOE pro variantu s využitím KGJ.....	69
Tabulka 4.11 Výroba vodíku pro jednotlivé varianty	70
Tabulka 4.12 Hodnoty pro variantu pouze s využitím FVE	71
Tabulka 4.13 Výsledky jednotlivých variant.....	71

Seznam grafů

Graf 2.1 Globální produkce vodíku dle zdrojů [5].....	14
Graf 2.2 Cena výroby vodíku [7]	15
Graf 2.3 Závislost proudové hustoty na napětí a účinnosti [18].....	24
Graf 2.4 Změna účinnosti se změnou teploty průběhu elektrolyzy	25
Graf 2.5 Účinnost systému a jeho schematický tvar [18].....	26
Graf 3.1 Měsíční sluneční ozáření a průměrná měsíční teplota v roce 2019.....	34
Graf 3.2 Potřeba tepla na vytápění pro soubor budov.....	40
Graf 3.3 Odběrový diagram teplé vody dle normy ČSN EN 12831-3.....	42
Graf 3.4 Potřeba tepla na přípravu teplé vody pro soubor budov.....	42
Graf 3.5 Potřeba elektrické energie v souboru budov.....	43
Graf 3.6 Měsíční bilance FVE systému orientace východ/západ	47
Graf 3.7 Měsíční bilance FVE systému orientace jih.....	48
Graf 3.8 Velikost přebytků FVE s orientací východ/západ v jednotlivých měsících	48
Graf 3.9 Velikost přebytků FVE s orientací jih v jednotlivých měsících	49
Graf 4.1 Závislost účinnosti elektrolyzéro na využití výkonu elektrolyzéro.....	50
Graf 4.2 Výroba vodíku v průběhu dne pro variantu zelený vodík	53
Graf 4.3 Využití vodíku pro pokrytí spotřeby elektrické energie pro varianta zelený vodík.	54
Graf 4.4 Graf export a importu elektrické energie pro variantu zelený vodík.....	54
Graf 4.5 Pokrytí tepla z výroby palivového článku pro variantu zelený vodík	55
Graf 4.6 Průběh naplnění akumulace v průběhu roku pro variantu zelený vodík	55
Graf 4.7 Výroba vodíku v průběhu dne varianta pro variantu šedý vodík	57
Graf 4.8 Využití vodíku pro pokrytí spotřeby elektrické energie pro variantu šedý vodík	58
Graf 4.9 Graf exportu a importu elektrické energie pro variantu šedý vodík.....	58

Graf 4.10 Pokrytí tepla z výroby palivového článku pro variantu šedý vodík	59
Graf 4.11 Průběh naplnění akumulace v průběhu roku pro variantu šedý vodík	59
Graf 4.12 Výroba vodíku v průběhu dne pro variantu SVR.....	62
Graf 4.13 Využití vodíku pro pokrytí spotřeby elektrické energie pro variantu SVR	62
Graf 4.14 Graf export a importu elektrické energie pro variantu SVR.....	63
Graf 4.15 Pokrytí tepla z výroby palivového článku pro variantu SVR	63
Graf 4.16 Průběh naplnění akumulace v průběhu roku pro variantu šedý vodík	64
Graf 4.17 Závislost utilizace elektrolyzátoru na jeho velikosti	65
Graf 4.18 Závislost utilizace článku na jeho velikosti	66
Graf 4.19 Utilizace akumulace v závislosti na její velikost.....	66
Graf 4.20 Vliv velikosti elektrolyzátoru na výrobu vodíku.....	67
Graf 4.21 Pokrytí potřeby elektřiny kogenerační jednotkou	68
Graf 4.22 Průběh importu a exportu elektřiny pro variantu KGJ	68
Graf 4.23 Pokrytí potřeby tepla varianta KGJ	69
Graf 4.24 Průběh spotřeby vodíku v průběhu dne.	72

Seznam příloh

Příloha1 – Výpočet základních parametrů pro soubor budov.xlsx

Příloha2 – Elektřina pro distrikt.xlsx

Příloha3 – Fotovoltaika.xlsx

Příloha4 – Model využití vodíku.xlsx

Příloha5 – Návrh kogenerační jednotky.xlsx

Příloha6 – Potřeba tepla pro distrikt hodinová data 2019.xlsx