ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV

VYUŽITÍ VODÍKU V SYSTÉMECH BUDOV

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vypracoval: **Bc. Vladimír Krystyn**

Vedoucí práce: **doc. Ing. Michal Kabrhel, Ph.D.**

2022/2023

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Krystyn Jméno: Vladimír Osobní číslo: 477222

Zadávající katedra: Katedra Technických zařízení budov (K125)

Studijní program: Inteligentní budovy

Studijní obor/specializace: Inteligentní budovy

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Využití vodíku v systémech budov

Název diplomové práce anglicky: Hydrogen use in building systems

Pokyny pro vypracování:
Zpracujte studii o možnostech využití vodíku v systémech budov.
Zpracujte projekt energetického systému objektu s využitím vodíku.
Posuďte ekonomickou a technickou proveditelnost daného řešení.
Zhodňoťte ekologický přínos využití vodíku.

Seznam doporučené literatury:
Design and assessment of a solar energy based integrated system with hydrogen production and storage for sustainable buildings. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, ISSN 0360-3199, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.082.
Česká vodíková platforma: Dostupné online. (https://www.hytep.cz/o-vodiku/ve-zkratce)
Optimal design and transient simulation next to environmental consideration of net-zero energy buildings with green hydrogen production and energy storage systém. Fuel, Volume 336, 2023,127126, ISSN 0016-2361, https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127126.

Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Michal Kabrhel, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 22.2.2023 Termín odevzdání DP v IS KOS: 22. 5. 2023
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce" a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací".

Datum převzetí zadání Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této závěrečné práce, je legální.

.....
Podpis

V Praze dne 22.5.2023 Vladimír Krystyn

Poděkování

Rád bych poděkoval všem, kteří mi pomáhali s přípravou práce nebo mě, jakkoliv podporovali během jejího vytváření. Zejména bych pak chtěl poděkovat svým rodičům, kteří mě celé moje studium podporovali, mým přátelům, kteří mi byli vždy nápomocni, a hlavně mému vedoucímu práce doc. Ing. Michalu Kabrhelovi, Ph.D., který mi byl ve všech směrech oporou.

Obsah

Úvod 9
Úvod do problematiky 9
Motivace 9
Cíl práce 10
Seznam použitých zkratek a symbolů 10
Teoretická část 12
Základní informace 12
Výroba Vodíku 13
Možné formy skupenství vodíku 16
Výroba vodíku v České republice 17
Elektrolýza vody 17
Palivový článek pro výrobu elektrické energie 18
Kogenerace – vodíková turbína 20
Spalování vodíku – kotle na vodík 20
Cena vodíku 22
Realizované projekty 23
Obytná budova v Delft - Nizozemsko 23
Německá vodíková vesnice ve zkušebním provozu 23
Malý elektrolyzér v ÚJV Řež o výkonu 6 kW 24
Phi Suea House – Motýli dům 26
První dům na vodík ve Švédsku 28
Výrobky 31
Kogenerační jednotka s palivovými články 31
Plynový kondenzační kotel na čistý vodík 32

Kompaktní jednotka pro rodinný dům 33
Domácí vodíková baterie 34
Zařízení pro výrobu demineralizované vody 35
Alternativy/konkurenti 36
Biometan 36
Bioplyn 36
Syntetické plyny – směs plynů CO2+H2 či N+H2 38
Dimethylether - rDME 38
Schéma možného řešení vodíkového hospodářství 39
Komunitní energetika 42
Praktická část 44
Návrh konceptu řešení 44
Základní informace o navrhované komplexu 45
Stavebně-technické vlastnosti objektů 46
Tepelná ztráta objektů dle ČSN EN 12 831-1 49
Potřeba tepla pro vytápění dle ČSN EN ISO 13 790 52
Potřeba tepla pro přípravu teplé vody 53
Energetické bilance pomocí nástroje NKN 55
Potřebné energie pro navrhovaný komplex 56
Stanovení přípojného výkonu 57
Energetické schéma systému 58
Projekt energetického systému s využitím vodíku 61
Předběžný návrh energetického hospodářství 61
Návrh FVE (Fotovoltaické elektrárny) 66
Návrh velikosti akumulace 70

Roční energetické bilance 75
Návrh vodíkového hospodářství 81
Výroba vodíku 81
Ukládaní vodíku 82
Stanovení velikosti úložiště pro vodík 84
Palivový článek 88
Návrh distribuční sítě 89
Půdorysné schéma centrální budovy 92
Půdorysné schéma 1.NP rodinného domu 95
Ekonomická a technická proveditelnost 96
Ekologicky přínos systému 100
Závěr 103
Seznam literatury a podkladů 105
Seznam obrázků, fotek 110
Seznam tabulek 111
Seznam grafů 112
Seznam příloh 113

Abstrakt

Náplní předkládané práce je studie o možnostech využití vodíku v systémech budov. Práce obsahuje návrh vodíkového hospodářství včetně nutných komponent tohoto systému. A následné ekologické a ekonomické zhodnocení daného systému. Tato práce také obsahuje teoretické informace k jednotlivým prvkům a realizované projekty či zařízení po celém světě.

Klíčová slova

Vodík, obnovitelné zdroje energie, vodíkové hospodářství, akumulace energie, ostrovní systém, fotovoltaická elektrárna, elektrolyzér, palivový článek.

Abstract

The content of the presented work is a study on the possibilities of using hydrogen in building systems. The thesis contains a design of the hydrogen economy including the necessary components of this system. And subsequent ecological and economic evaluation of the given system. This work also contains theoretical information on individual elements and implemented projects or devices around the world.

Keywords

Hydrogen, renewable energy sources, hydrogen economy, energy storage, off-grid system, photovoltaic power plant, electrolyzer, fuel cell.

Úvod

Úvod do problematiky

Diplomová práce se zabývá základním pohledem a hodnocením možnosti využití vodíku pro budovy. Téma vodíku jako paliva je zvlášť v této době velmi aktuální, a to hlavně z důvodu, že při jehož spalování nevznikají emise CO2, tedy jedná se o bezemisní zdroj energie. Obecně se většina článků a publikací věnuje tomuto tématu hlavně v oblasti transportu. Má práce by měla nastínit využití vodíku hlavně ve spojení s budovami, stanovit možné varianty využití tohoto paliva a následně zpracovat projekt energetického systému objektu s využitím vodíku. V rámci momentálních problémů s množstvím zemního plynu a hlavně s jeho cenou se nabízí jako alternativa právě vodík, ať už by se přimíchával do zemního plynu, nebo by ho plnohodnotně nahradil.

Já bych se chtěl ve své práci věnovat spíše ostrovním systémům, které by si dokázaly toto palivo vyrábět a spotřebovávat samy. Otázkou pak zůstává posouzení ekonomické a technické proveditelnosti daného řešeni. Hlavním benefitem bude bezpochyby jeho ekologický přínos.

Motivace

Hlavní motivací pro vytvoření této diplomové práce bylo posoudit proveditelnost systémů s využitím vodíku. Vodík se stává stále důležitějším zdrojem energie v době, kdy se hledají alternativy k fosilním palivům. Využití vodíku jako paliva v systémech budov se stává stále populárnějším řešením pro snižování emisí a zlepšování energetické efektivity. Sepsáním této práce bych chtěl získat nejen hlubší znalosti v této oblasti, ale také přispět k zlepšování kvality našeho životního prostředí a podpořit budoucnost udržitelné energie.

Cíl práce

Hlavním cílem práce je provést studii o možnostech využití vodíku v systémech budov. Hlavní inspirací by měly sloužit zahraniční projekty již realizovaných systémů, kde již proběhl testovací provoz. V následné fázi udělat projekt energetického systému pro komplex rodinných domů včetně ekonomického a ekologického zhodnocení celého systému.

Seznam použitých zkratek a symbolů

CCS, CCUS	Zachytávání a ukládání oxidu uhličitého
FVE	Fotovoltaická elektrárna
TV	Teplá užitková voda
CZT	Centrální zásobování teplem
KVET	Kombinovaná výroba elektřiny a tepla
R_{si}	Odpor při přestupu tepla na vnější straně [$m^2 \cdot K/W$]
R_{se}	Odpor při přestupu tepla na vnější straně [$m^2 \cdot K/W$]
R	Odpor při přestupu tepla [$m^2 \cdot K/W$]
ZZT	Zpětné získávání tepla
$H_{t,ie}$	Měrný tepelný tok prostupem tepla [W/K]
$H_{v,i}$	Měrný tepelný tok tepla větráním [W/K]
$Q_{H,ht}$	Výpočtová tepelná ztráta [kW]
Q_{TV}	Tepelný výkon nutný k dohřevu TV [W]
V_{TV}	Objem zásobníku TV [m^3]
τ_a	Doba ohřevu TV při teplotním rozdílu pro dohřev TV [s]
ρ	Hustota vody při střední teplotě zásobníku [kg/m^3]
c	Měrná tepelná kapacita vody při střední teplotě zásobníku [J/(kg.K)]
X_p	Spínací diference pro dohřev TV (5 nebo 10 K) [K]
y	Korekční faktor odběru tepla ze zásobníku TV [-]
t_{TV}	Teplota teplé vody

t_{SV}	Teplota studené vody
Q_H	Tepelný výkon pro krytí tepelné ztráty [kW]
$Q_{W,s}$	Střední hodnota tepelného výkonu pro ohřev vody [kW]
$Q_{W,max}$	Tepelný výkon ohříváků [kW]
VZT	Vzduchotechnika
ZTV	Zásobník teplé vody
ZV	Zásobník pro vytápění
kWp	Výkon fotovoltaického panelu/elektrárny za standardních testovacích podmínek
PEM	Typ elektrolyzéru (Proton Exchange Membrane)
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System
tw1	Teplota vody na vstupu do tepelné sítě
tw2	Teplota vody na výstupu ze spotřebičů
kz	Součinitel ztrát v síti
A	Průřez potrubí [m2]
w	Rychlost proudění [m/s]
ρ	Hustota kapaliny, páry pro střední teplotní podmínky [kg/m3]
CO_2	Oxid uhličitý
H_2	Vodík

Teoretická část

Vodík jako palivo dokáže při hoření uvolňovat třikrát více energie než zemní plyn a dvakrát více energie než spalování benzínu.

Základní informace

Vodík objevil roku 1766 Angličan Henry Cavendish. Jedná se o hořlavý plyn, bez barvy, chuti či zápachu. Je přibližně 14,5 krát lehčí než vzduch a je hůře stlačitelný. V případné kombinaci se vzduchem se z něj vytváří výbušná směs.

Fyzikálně-chemické vlastnosti:

Krystalová struktura	šesterečná
Teplota tání	14,025 K
Teplota varu	20,268 K
Molární objem	11,42 · 10−6m^3 (½ mol H2 při 2 K)
Tlak nasycené páry	209 Pa při 23 K
Rychlost zvuku	1270 m/s při 298,15 K
Měrná tepelná kapacita	14304 J/(kg K)
Tepelná vodivost	0,1815 W/(m K)
Spalné teplo vodíku	72 kJ/mol
Výhřevnost	59,775 kJ/mol

Vodík je zastoupen ve vesmíru, kde tvoří 90 % počtu všech atomů přítomných ve vesmíru. V přírodě se vyskytuje jen ojediněle. Plynný vodík je součástí zemního plynu a je obsažen ve všech organických sloučeninách. Je spolu s uhlíkem, kyslíkem, dusíkem významným prvkem. [1] [2]

Objevil jsem zdroje, ve kterých se zmiňuje o tzv. „zlatém vodíku“, který se nachází v ložiskách pod zemským povrchem. Jejich objevení a množství těchto ložisek je zatím pouze hypotetické a je otázkou, jak velký objem vodíku může být odčerpán způsobem obdobným zemnímu plynu.

Výroba Vodíku

Vodík se dá rozdělit do následujících čtyřech skupin dle způsobu jeho výroby nebo dle použitých surovin pro výrobu.

Hnědý vodík

Hnědý vodík je vedlejším produktem zplyňování černého uhlí nebo lignitu (hnědého uhlí). Zplyňování je proces často používaný v průmyslových procesech k výrobě uhelného plynu nebo syntézního. Ve vodíkovém spektru je hnědý vodík zdaleka nejnáročnější na uhlík a poškozuje životní prostředí kvůli emisím skleníkových plynů, které se uvolňují během procesu. [2]

Šedý vodík

Někdy označován také jako černý vodík se vyrábí pomocí parního metanového reformování (SMR) ze zdroje metanu, jako jsou fosilní paliva a zemní plyn. SMR je proces, který ohřívá metan párou, typicky za použití katalyzátoru, za vzniku kombinace oxidu uhelnatého a vodíku. Ačkoli je šedý vodík ve vodíkovém spektru o něco lepší než hnědý vodík, má stále velkou uhlíkovou stopou, protože proces nezachycuje emise skleníkových plynů uvolněné během SMR. [2]

Modrý vodík

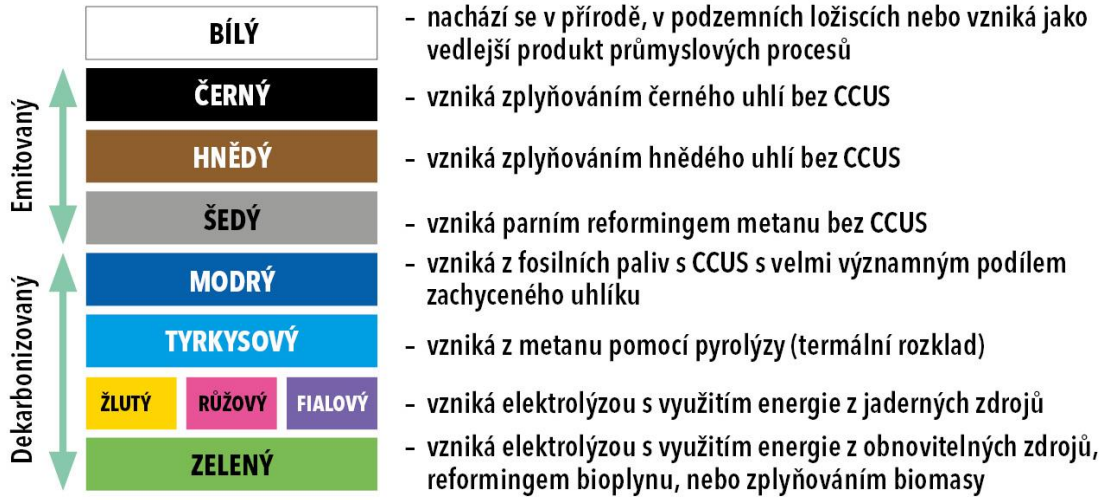
Modrý vodík se vyrábí stejným způsobem jako šedý vodík pomocí SMR ze zdroje metanu, jako je zemní plyn, ale s jedním velkým rozdílem: emise skleníkových plynů uvolněné během SMR jsou výrazně sníženy díky použití zachycování a ukládání uhlíku. Tento proces se označuje zkratkou CCS. Zachycuje, přepravuje a ukládá emise skleníkových plynů jejich vstřikováním zpět do země. Tento proces je považován za méně náročný na uhlík než ostatní dosud uvedené způsoby, ale stále nepředstavuje nulové emise, proces SMR se nevyhýbá produkci emisí skleníkových plynů. [2]

Zelený vodík

Zelený vodík se vyrábí pomocí čisté elektřiny z obnovitelných zdrojů energie, jako je solární nebo větrná energie. Elektrolýza vody je proces, který posílá

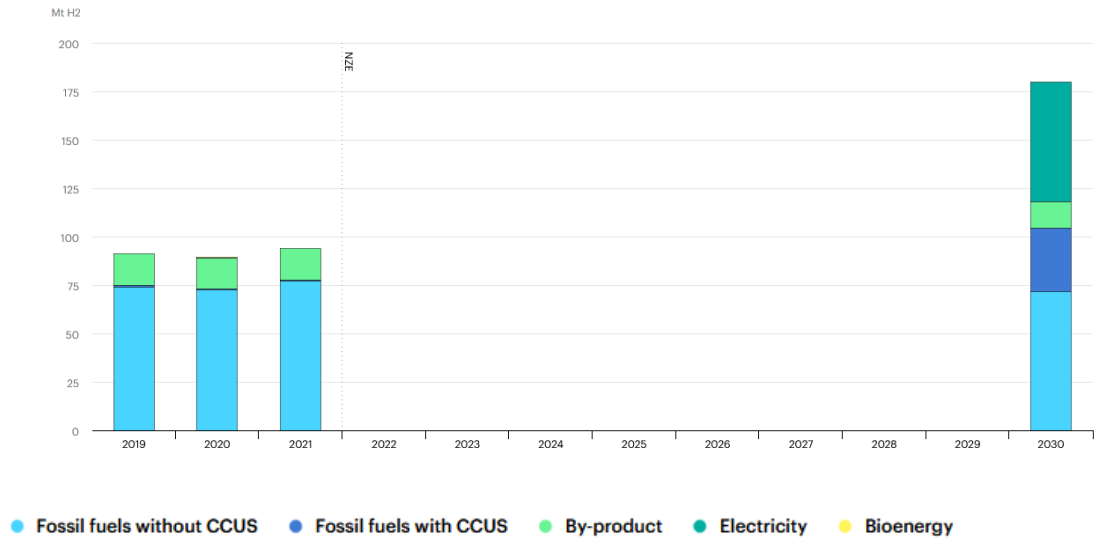
čistou elektřinu do vody, aby způsobil elektrochemickou reakci štěpící vodu na její vodíkové a kyslíkové složky. Zelený vodík je považován za proces výroby vodíku s nulovými emisemi, přičemž použití obnovitelných zdrojů eliminuje veškeré uhlíkové emise. [2]

Dále se můžeme zmínit o bílém, tyrkysovém, žlutém, růžovém či fialovém vodíku, který nemá tak velké zastoupení, ale můžeme se s tímto výrazem v literatuře také potkat. [3]

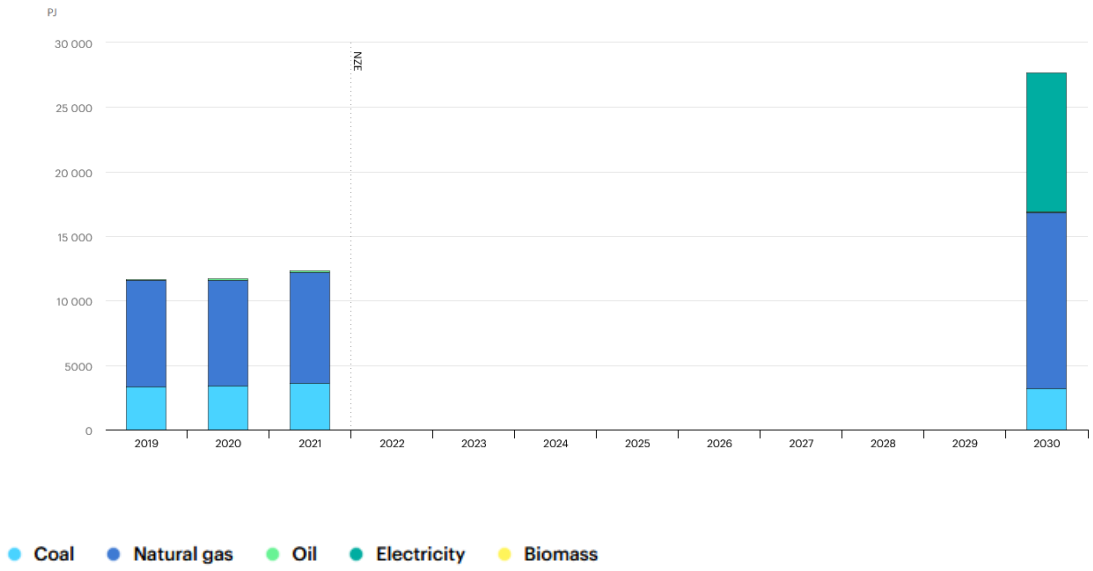


Obrázek 1 - druhy vodíku dle barevného označení [4]

Cíle výroby vodíku pro rok 2030 dle „Net Zero Scenario“. Je zde evidentní trend pro zvýšení podílu výroby zeleného a modrého vodíku, tedy snížení surovin s velkou uhlíkovou stopou.

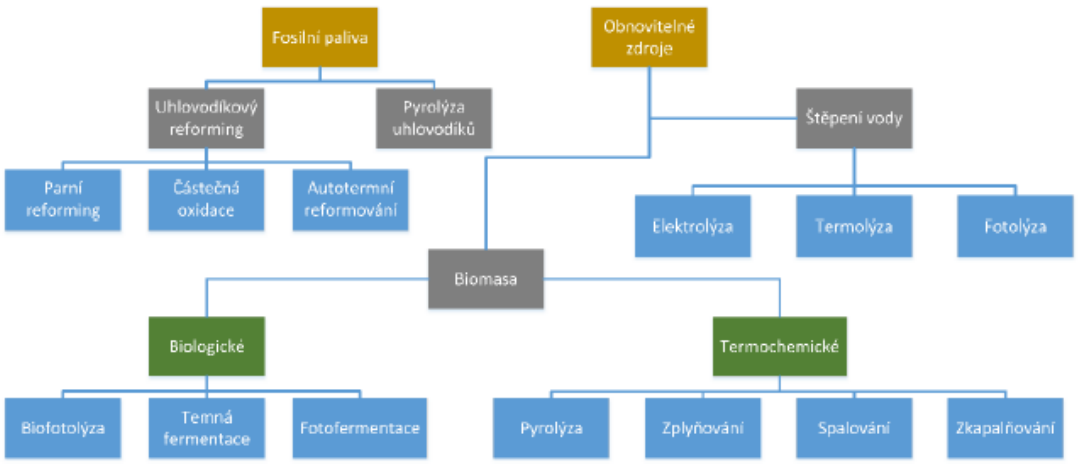


Obrázek 2 - Výroba vodíku dle technologie výroby [5]



Obrázek 3 - Výroba vodíku dle použitých surovin pro výrobu [5]

V současné době přibližně 96 % vyrobeného vodíku pochází z fosilních paliv. Okolo 4 % se vyrábí pomocí elektrolýzy vody (zelený vodík, v případě použití elektrické energie z obnovitelných zdrojů). Tento poměr by se v následujících letech měl teoreticky změnit ve prospěch zeleného vodíku, tedy bezemisní výroby vzhledem k aktuální energetické politice, která čím dál více nabádá k emisně čistým výrobcům energie.



Obrázek 4 - Způsoby výroby vodíku [6]

Možné formy skupenství vodíku

Vodík jako takový je možno uložit v různých skupenstvích:

1. Uložení ve formě vodíku (H2) v plynném stavu:
   - Teplota: -252,8°C
   - Tlak: 100 barů
   - Hustota: 0,08988 kg/m3

2. Uložení ve formě vodíku (H2) v kapalném stavu:
   - Teplota: -253,2°C
   - Tlak: 20-25 barů
   - Hustota: 70 kg/m3

3. Uložení ve formě metanu (CH4):
   - Teplota: -161,5°C
   - Tlak: 25-50 barů
   - Hustota: 0,717 kg/m3

4. Uložení ve formě amoniaku (NH3):
   - Teplota: -33°C
   - Tlak: 20-30 barů
   - Hustota: 0,77 kg/m3

5. Uložení ve formě vodíku (H2) ve formě hydrátu:
   - Teplota: -10°C
   - Tlak: 10-20 barů
   - Hustota: 350-1000 kg/m3

Výroba vodíku v České republice

Na území České republiky je relativně malý potenciál pro výrobu zeleného vodíku. Klimatické a geografické podmínky nenabízí velký potenciál využití větrných elektráren. Obecně je na našem území nižší počet než v sousedních přímořských státech, kde na pobřežích moří vanou silné a stabilní větry. V české republice aktuálně neexistuje žádný velký elektrolyzér, který by byl primárně určen k výrobě zeleného vodíku. Jeden malý elektrolyzér využívající energii slunce o výkonu 6 kW se nachází v ÚJV Řež, severně kousek za Prahou. Tento elektrolyzér je dále popsán v samostatné kapitole. Přesto v ČR velké elektrolyzéry existují, ale používají se primárně k výrobě jiných chemických látek. Největší český elektrolyzér, který provozuje společnost Spolchemie, slouží pro výrobu chloru, kde vzniká vodík jako vedlejší produkt. Do budoucna se uvažuje využit tohoto plynu pro městské dopravní prostředky v městě Ústí nad Labem. Nejvíce vodíku dle dohledaný informací vyrábí společnost Unipetrol, která ročně vyrobí více než 85 tisíc tun vodíku, který dále spotřebovává hlavně na výrobu amoniaku. [7]

Elektrolýza vody

Pro rozdělení vody na H2 a O2 se spotřebuje o 30 % více energie, než se uvolní při zpětném připojení těchto složek, tj. při spalování vodíku.

Na výrobu 1 kg vodíku a 8 kg kyslíku je potřeba 8,92 litrů demineralizované vody, tzn. vody zbavené všech přítomných minerálů (ještě čistší než destilovaná voda). Elektrolýza je proces, při kterém stejnosměrný elektrický proud štěpí chemickou vazbu mezi vodíkem a kyslíkem ve vodném roztoku.

$2\ H_2O \rightarrow 2\ H_2 + O_2$

Existuje několik typů elektrolyzérů pro výrobu vodíku, zde jsou tři z nejznámějších:

Elektrolyzér s alkalickou vodnou elektrolytovou buňkou (AEC): AEC elektrolyzér je nejstarší a nejrozšířenější typ elektrolyzéru pro výrobu vodíku. V této technologii se používá alkalický elektrolyt, obvykle roztok hydroxidu

draselného nebo hydroxidu sodného. Tento elektrolyt umožňuje vysokou vodivost, ale také vyžaduje použití korozivzdorných materiálů pro konstrukci elektrolyzéru. AEC elektrolyzér pracuje při vyšších teplotách a tlacích a dosahuje vyšší účinnosti než jiné typy elektrolyzérů.

Protonově výměnný membránový elektrolyzér (PEM): PEM elektrolyzér využívá katalytické reakce na speciálně navrženém kovovém katalyzátoru pro rozklad vody na vodík a kyslík. Tento typ elektrolyzéru používá protonově výměnnou membránu (PEM), která odděluje anodovou a katodovou část elektrolyzéru a umožňuje použití neagresivního elektrolytu. PEM elektrolyzéry jsou schopny pracovat při nižších teplotách a tlacích než AEC elektrolyzéry a také se rychleji přizpůsobují změnám zátěže.

Solid oxide elektrolyzér cell (SOEC): SOEC elektrolyzér je novější technologií a využívá pevných oxidů jako elektrolytu. Tento typ elektrolyzéru umožňuje vysokou efektivitu a je schopen pracovat při vysokých teplotách, což umožňuje využití odpadního tepla z jiných procesů. SOEC elektrolyzér však vyžaduje vysoké teploty a může být nákladný na výrobu a údržbu.

Základní vlastnosti elektrolyzéru závisí na konkrétním typu a velikosti elektrolyzéru. Všechny elektrolyzéry pro výrobu vodíku však potřebují zdroj elektrické energie například z obnovitelných zdrojů, jako jsou solární nebo větrné elektrárny.

Palivový článek pro výrobu elektrické energie

Palivový článek je zařízení, které přeměňuje chemickou energii z paliva, v tomto případě plynného vodíku, na elektrickou energii prostřednictvím elektrochemických reakcí.

Princip fungování palivového článku s použitím plynného vodíku je založen na tzv. reakci elektrolytu. Palivový článek obsahuje anodu, katodu a elektrolyt, který odděluje tyto dvě elektrody. Vodík a kyslík reagují na protonově vodivé membráně (PEM), která je umístěna mezi dvěma

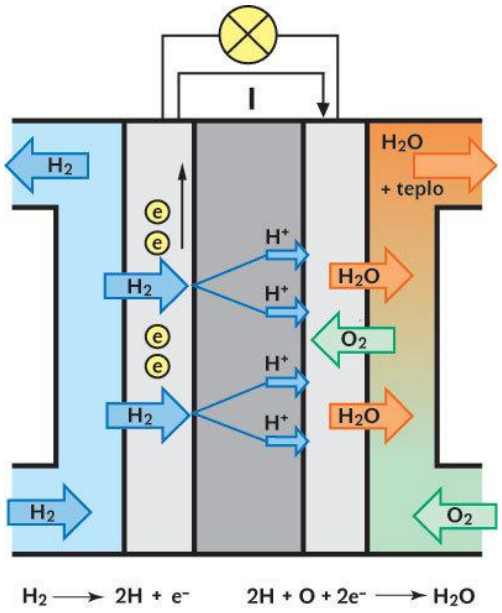
elektrodami. Na jejich povrchu je nanesena slabá vrstva platiny, která slouží jako katalyzátor reakce.

Postupné zdokonalení a zlevnění palivového článku umožňuje jeho větší použití. Palivové články se využívají i jiných oblastech, než je energetika, jako je například doprava. V systémech budov, kde mohou sloužit jako zdroj elektřiny a tepelné energie s nízkými emisemi a vysokou účinností. [8]

Reálná účinnost palivového článku se v současnosti pohybuje okolo 50 %.

Z 1 kg vodíku je po dodání kyslíku palivový článek schopný vyrobit 16 kWh elektrické energie + 16 kWh tepla + vodu (vodní páru).

Problém je poměrně vysoká cena palivových článků. Jejich životnost je garantována okolo 25 let. Životnost palivových článků je u současných produktů garantována na 5-20 000 hodin provozu. [9]



$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$$

Obrázek 5 - Vodíko-kyslíkový palivový článek [10]

Kogenerace – vodíková turbína

Plynové turbíny se v současnosti používají hlavně v teplárenství a pro soustavy CZT. Můžou být poháněny různými druhy paliv, ale zhruba 90 % z nich běží na zemní plyn. Při spalování fosilního paliva se produkuje oxid uhličitý a ten následně uniká do atmosféry. Při těžbě se vytvářejí skleníkové plyny, které jsou přibližně 80krát horší než oxid uhličitý během následujících 20 let.

V závodě směrem k nulovým emisím do roku 2050 se plynové turbíny budou muset přizpůsobit, nebo zaniknout. Několik organizací se snaží převést turbíny k používání zeleného vodíku jako čistého zdroje energie. Existuje více než 100 turbín, které běží na minimálně 5 % vodíkového paliva. A tvrdí se, že jsou na cestě k dosažení 100% podílu. Výzkumníci na univerzitě v Stavangeru v Norsku tvrdí, že už předběhli všechny a mají běžící plynovou turbínu spalující 100 % vodíku. Univerzita provozuje svou vlastní mikroplynovou elektrárnu a její plynová turbína produkuje teplo, elektřinu a horkou vodu pro vytápění.

Účinnost běhu turbíny na vodík dosahuje nízkých hodnot, nicméně hlavní výhoda spočívá v možnosti využití již existující infrastruktury. Výzkumný tým se nezaměřil pouze na optimalizaci spalovací komory pro vodík, ale i na přizpůsobení palivového systému a stávající infrastruktury pro zemní plyn k tomuto velmi odlišnému plynu.

V budoucnu by tyto projekty mohly vést ke konverzím, které by udržely staré turbínové zařízení naživu a zároveň je změnit na zdroje paliva s nulovými emisemi. Než se však tyto druhy projektů stanou ekonomicky životaschopnými, musí cena zeleného vodíku podstatně klesnout. [11]

Spalování vodíku – kotle na vodík

Spalování vodíku je chemický proces, při kterém se vodík sloučí s kyslíkem, aby vytvořil vodu a uvolnil energii. Spalování vodíku produkuje velmi málo škodlivých emisí a výsledkem je čistá voda. Proto se spalování vodíku často označuje za ekologickou alternativu k fosilním palivům.

Vodík může být spalován v různých typech spalovacích motorů, včetně motorů s vnitřním spalováním, turbín, hořáků a dalších. Tyto motory jsou často používány pro pohon elektrických generátorů nebo vozidel, jako jsou automobily a letadla.

Nicméně spalování vodíku také má své nevýhody. Vodík má nízkou hustotu, takže je potřeba velké množství plynu pro produkci dostatečného množství energie. Nejdůležitější stránkou je výroba, ta může vytvářet emise CO2 a dalších škodlivých látek, viz kapitola o typech vodíků.

V mé práci se zabývám spalováním vodíku v souvislosti s budovami. Katalytický vodíkový kotel je obdoba plynového kondenzačního kotle, který je napájen vodíkem. Toto zařízení je projektováno pro ohřev vody v topných systémech či pro systém vytápění.

Kotel je tedy napájen vodíkem v plynném stavu, nicméně „spalování" je bez plamene, kde dochází ke katalytické reakci. Katalyzátor umožňuje efektivní spalování vodíku při nižších teplotách než u tradičních spalovacích procesů.

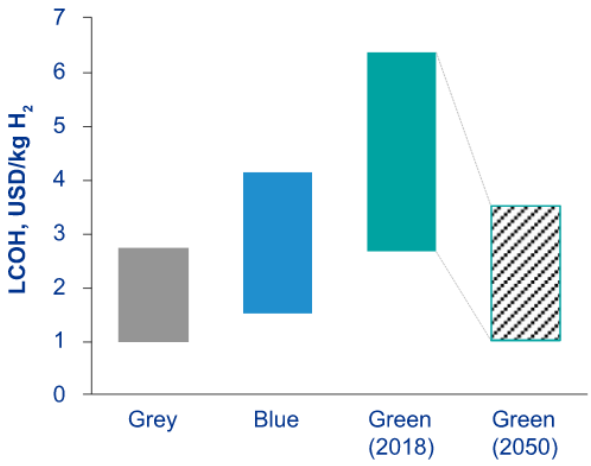
Při spalování vodíku v katalytickém kotli se uvolňuje teplo, které je následně využíváno k vytápění vody nebo prostorů. Teplo může být distribuováno prostřednictvím radiátorů, podlahového vytápění nebo ohřevu teplé vody. Na výfuku se vytváří pouze voda ve dvou skupenstvích, jejíž jedna část je zkondenzovaná, zatímco druhá je odváděna ve formě vodní páry výfukovým potrubím.

Hlavní výhodou katalytického kotle na vodík je jeho čistý provoz. Při spalování vodíku nevzniká oxid uhličitý (CO2), ani jiné znečišťující látky, pouze voda je produktem spalování vodíku. To z něj činí ekologicky šetrné a bezemisní řešení pro vytápění budov. [12]

Cena vodíku

Cena je závislá na způsobu výroby. Výroba zeleného vodíku je úměrná ceně elektřiny z obnovitelných zdrojů energie.

Cílem je do roku 2030 postavit 40 GW elektrolyzérů uvnitř EU a podpořit výstavbu dalších 40 GW elektrolyzérů za hranicemi pro navýšení importu. [7] Také jsem se dočetl o plánu, který reaguje na současné dění na Ukrajině. V rámci obnovy zdevastované krajiny, která bezesporu bude potřebovat nápravu, by se na území Ukrajiny vybudovalo velké množství elektrolyzérů. Následně by se vyrobený vodík pouštěl stávající distribuční sítí a postupně by se Evropa mohla zbavit závislosti na ruském plynu. Myslím si, že tato představa zní až moc pozitivně. Kromě navýšení kapacit výroby by mělo dojít také ke snížení ceny zeleného vodíku. Aby toho mohlo být docíleno, je potřeba také technologického pokroku a zvyšování účinnosti samotných elektrolyzérů.



Obrázek 6 - vývoj ceny zeleného vodíku [13]

Realizované projekty

Obytná budova v Delft - Nizozemsko

Nizozemské konsorcium vedené Technologickou univerzitou v Delftu (TU Delft) a organizací pro sociální bydlení Woningcorporaties napojilo stávající obytnou budovu umístěnou v kampusu univerzity na podzemní vodíkovou síť, která nyní pokrývá veškerou poptávku po vytápění a přípravě teplé vody.

Projekt nazvaný H2 Home je jedním z prvních svého druhu v kontinentální Evropě, neboť kombinuje podzemní vodíkovou síť podobnou síti zemního plynu a vodíkové potrubí, které prochází budovou a je napojeno na kotel na vytápění v podkroví.

Podle výzkumné skupiny má vodík nižší energetickou hustotu než zemní plyn a při využití stávající infrastruktury je třeba výrazně zvýšit průtok vodíku, aby byla pokryta stejná energetická potřeba. V budově bylo nutné upravit stávající regulátory tlaku plynu a inteligentní uzávěr přívodu plynu, které nebyly pro použití vodíku okamžitě vhodné, stejně jako plynoměr a potrubí. Kromě toho výzkumníci přidali komunikační modul pro provozovatele sítě, aby prostřednictvím monitorování zajistili bezpečnost systému.

Díky navrhované konfiguraci by obyvatelé budovy neměli vnímat žádný rozdíl v užívání a pohodlí ve srovnání se systémem založeném na konvenčním kotli ústředního vytápění. Systém a všechny jeho komponenty jsou v provozu od listopadu 2021. [14]

Německá vodíková vesnice ve zkušebním provozu

Projekt demonstruje, jak lze budovy zásobovat teplem a elektřinou inteligentně a efektivně pomocí zelené vodíkové sítě. Tento projekt vznikl v centru chemického parku Bitterfeld-Wolfen. V testovací vesnici H2 se v reálných podmínkách testuje dodavatelská infrastruktura a koncové použití. Důležitou roli hrají také materiály a technologie, které umožňují využití paliva pro zásobování budov energií.

Testovací vesnice se nachází na strategickém místě ve středu Německa z několika důvodů. Druhý nejdelší plynovod v Německu vede přes Sasko-Anhaltsko a zaručuje efektivní přepravu zeleného vodíku. Jako další důvod lokality jsou obrovské podzemní solné jeskyně, které mohou ukládat obrovské množství vodíku. Obnovitelná energie tvoří 60 procent spotřeby energie v Sasku-Anhaltsku, což je další důvod, proč se vodíková vesnice nachází právě zde. Pro distribuci bylo použito 675 metrů plastového potrubí, které nahradilo standardní kovové trubky.

Berlínská společnost vyvíjí a staví vodíkové kogenerační jednotky, které lze použít nejen k vytápění budov, ale také k jejich zásobování elektřinou. Bohužel v současné době je výroba vodíku dražší než výroba zemního plynu. Průlom pro výzkumné a vývojové oddělení společnosti nastal, když navázali spolupráci s výrobcem zařízení na kombinovanou výrobu tepla a elektřiny s palivovými články H2 známé jako inhouse5000+ Hydrogen (toto zařízení popsáno dále v této prací). Umožňuje využití vodíku k výrobě elektřiny a tepla na zimu a má přídavné tepelné čerpadlo pro chlazení budov v létě.

Vodík musí být přepravován při vysokém tlaku v přepravním potrubí a při nízkém tlaku v distribučních sítích pro koncové uživatele. Probíhá také výzkum umožňující koncovým uživatelům cítit vodík, což je ve skutečnosti plyn bez zápachu. Ve vesnici byl palivový článek testován na sirný zápach. Zápach však musí být z vodíku odstraněn před jeho vstupem do palivového článku, což snižuje účinnost celého systému. A proto je třeba jej ještě zlepšit, aby se vyplatilo jeho použití. [15] [16]

Malý elektrolyzér v ÚJV Řež o výkonu 6 kW

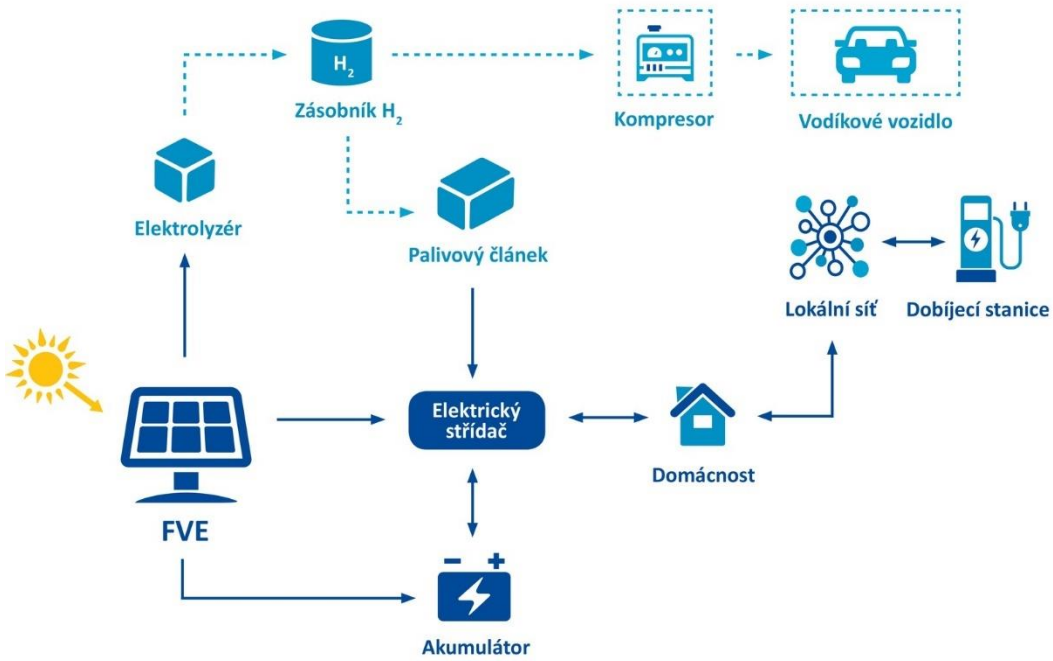
ÚJV Řež je významné výzkumné a vývojové centrum se zaměřením na jadernou energetiku a další oblasti vědy a techniky. Co se týče elektrolyzéru, ÚJV Řež se zabývá výzkumem a vývojem různých typů elektrolyzérů, včetně elektrolyzéru pro výrobu vodíku.

Projekt je principiálně založen na ukládání přebytků elektrické energie z fotovoltaických panelů do systémů pro výrobu vodíku. Systém se skládá z fotovoltaické elektrárny, elektrolyzéru PEM, zásobníku na stlačený plynný vodík a palivového článku PEM. Celý systém je připojení do lokální distribuční sítě. Cílem je zlepšit účinnost, spolehlivost a ekonomickou proveditelnost těchto zařízení.

V rámci výzkumu elektrolyzéru se v ÚJV Řež provádějí experimenty, testy a analýzy, které se zaměřují na optimalizaci provozních podmínek, snižování nákladů na výrobu vodíku a zvyšování výkonu elektrolyzéru.

Tento systém může mít využití pro malé až velké podniky, které z nějakého důvodu potřebují záložní zdroj elektrické energie. Systém se dále dá využít pro domy či komplexy bez přístupu k elektrické síti či zemního plynu. Neboli pro všechny podniky či komplexy, které chtějí provozovány v ostrovním režimu.

Výhodou celého systému je účinná výroba tepla a elektrické energie z vodíku a nízko-emisní zařízení, které pomůže k lokálnímu zlepšení kvality ovzduší či snížení emisí, prachu a hluku. Další výhoda je dlouhodobé skladování energie či záložní využití systému v případě výpadku elektrického proudu. [17]

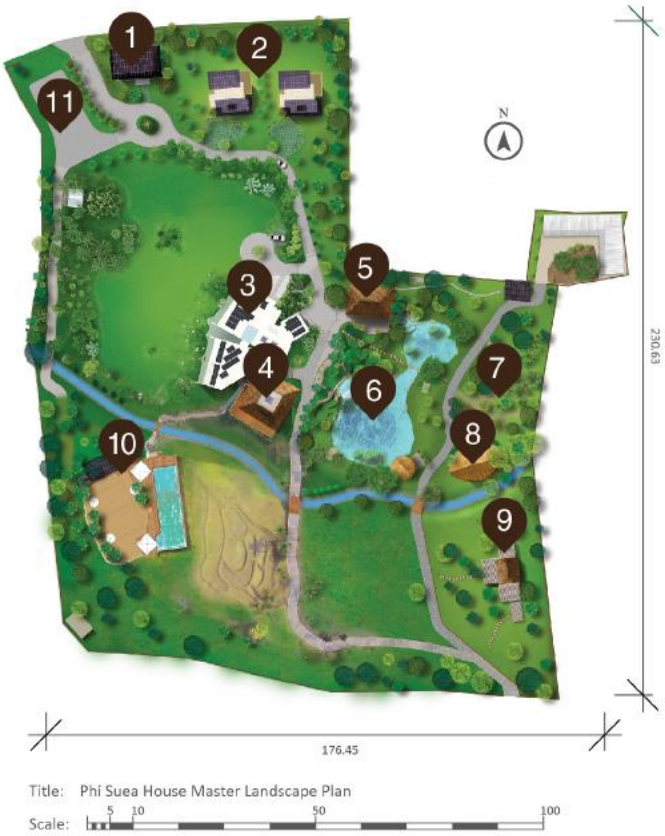


Obrázek 7 - Schéma elektrolyzéru v ÚJV Řež [17]

Phi Suea House – Motýli dům

Komplex, který se nachází v městě Chiang Mai v Thajsku. Jeden ze sloganů, který se objevuje na stránkách domu: „Domov je tam, kde je vodík.“

Na začátku roku 2015 se stala stavba světově prvním soběstačným domem poháněným systémem čisté energie na bázi vodíku. Komplex je postaven na principech energeticky efektivního designu a má energetickou budovu, dva penziony, jeden hlavní rodinný dům, dílnu a samostatnou hlavní kuchyni a terasu. Využívá přirozené proudění vzduchu k chlazení, inteligentní řídicí systém zvyšuje pohodlí a úsporu energie. Voda je zachycována a upravována ve filtračním systému

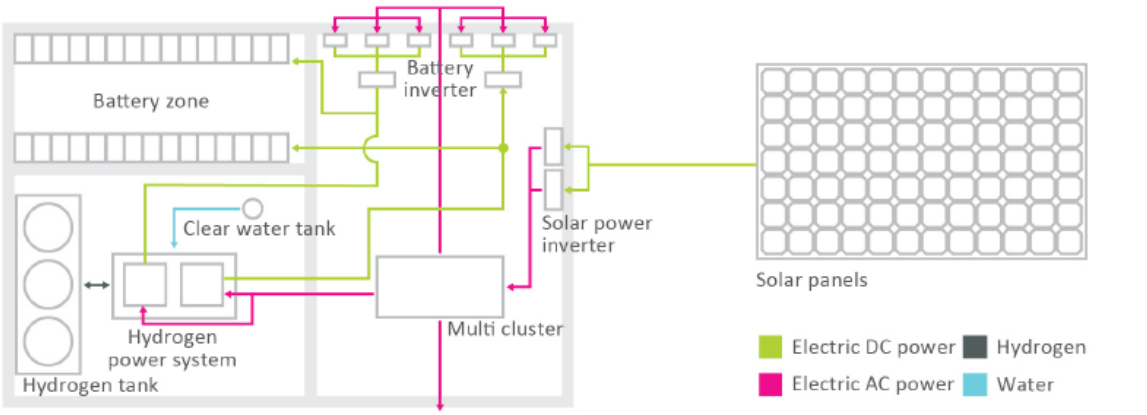


Obrázek 8 - situace komplexu se zaznačením základních budov [18]

Fotovoltaické panely pokrývají jeho denní spotřebu energie a jakákoli přebytečná vyrobená elektřina proudí do hybridního systému pro ukládání energie baterie-vodík. Zde se elektřina a voda během dne přeměňují na zelený vodík pomocí elektrolyzérů AEM, přičemž palivové články v případě potřeby převádějí vodík zpět na elektřinu. Baterie (olověný gel se zárukou plné recyklace) se používají k vyrovnání denní spotřeby, zatímco uložený vodík umožňuje systému poskytovat sezónní skladování – spolehlivě pokryje měsíční spotřebu asi 6 MWh po celý rok.

Dům Phi Suea se stal centrem vodíkových aktivit a hostil akce jako Hydrogen Energy Summit 2018. V roce 2021 označen jako Vodíkové údolí – jeden z nejpokročilejších vodíkových projektů na světě – mise Evropské unie Innovation Hydrogen. Thajsko se svým hojným sluncem a mnoha ostrovy se může stát majákovým národem pro zelené vodíkové mikrosítě, které eliminují používání nafty. [18]

Obrázek 9 - Foto hlavního objektu s fotovoltaickými panely [18]



PV installed:	86kW
Average daily power production:	326.8kWh
Phi Suea House energy demand:	6000kWh monthly
Battery:	2x 2000Ah, 48V lead-acid battery banks
Hydrogen gas production rate:	max. 2000 litres/hour
Hydrogen storage capacity:	90,000 litres of H2 at 30 bar, equivalent to 130 kWh in the fuel cell

Obrázek 10 - schéma vodíkového systému [18]

První dům na vodík ve Švédsku

Hans-Olof Nilsson je švédský inženýr z chladírenského průmyslu, který se rozhodl postavit si dům, který není připojen na inženýrské sítě, a ukládat letní přebytky ze slunce do vodíku. Dům je situován 10 km od Getheborgu, tedy místní podnebí a lokace nenahrává výrobě elektrické energie s využitím slunečního záření.

Celá jižní střecha je pokryta fotovoltaickými panely a fototermickými kolektory. Fotovoltaická elektrárna o ploše 140 metrů čtverečních o výkonu 20 kWp a kolektory o ploše 20 metrů čtverečních 13 kW tepelné energie. Dále jsou na fasádě umístěny vertikální fotovoltaické panely o výkonu 0,8 kWp, které zachycují zimní slunce.

Bateriové úložiště o kapacitě 144 kWh – vystačí na chod domu na celých 5 dní včetně tepla. Když jsou baterie nabité na 85 %, energie ze solárních PV je přesměrována na výrobu vodíku elektrolýzou vody. Když úroveň nabití klesne pod 30 %, například po několika zamračených dnech s nízkou produkcí solární energie, palivový článek použije vodík k výrobě elektrické energie a následnému dobití baterií.

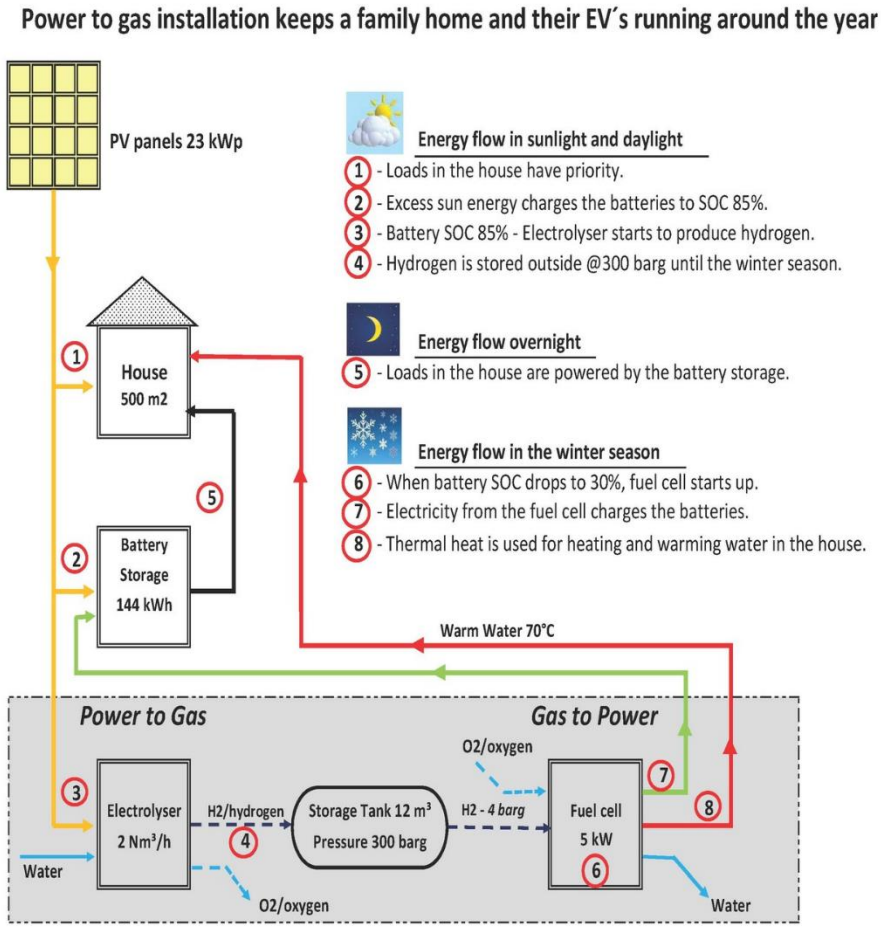
Elektrolyzér je dodán od dánské společnosti GreenHydrogen. Výroba a uložení 1 Nm³ vodíku s kalorickým obsahem energie 3,3 kWh vyžaduje pro výrobu 5,5 kWh. Z 1 m3 vodíku se v palivovém článku vyrobí 1,5 kWh elektřiny a 1,5 kWh tepla.

Vodíkový palivový článek je funkční prototyp švédského výrobce palivových článků PowerCell. Byl vyvinut speciálně pro tento dům jako oboustranně výhodný projekt umožňující vyrábět potřebné teplo a elektřinu v zimním období a vytvářet obrovské množství dat a zkušeností pro zmiňovanou společnost. Zásobník pro ukládání vodíku je navržen o velikosti 12 m3. Vodík bude skladován při 300 barech. Současná produkce vodíku se pohybuje okolo 3 000 Nm³ ročně.

V domě se také nachází tři 1000 litrové nádrže, ve kterých se nachází voda o teplotě 35°C pro venkovní systém tání sněhu a ledu pod dlážděnou příjezdovou cestou a dvorem. Plastové trubky jsou umístěny 10 cm pod dlážděným povrchem. Teplá voda cirkuluje, aby ohřívala výše uvedený povrch a rozpouštěla veškerý led a sníh během zimy. Systém není spuštěn neustále. Zapíná se v případě potřeby uživatele, kdykoli se nahromadí sníh nebo led.

Do systému je zařazeno i geotermální tepelné čerpadlo o výkonu 13 kW, které odebírá energii ze dvou geotermálních vrtů dlouhých 180 metrů pod povrchem terénu. Tepelné čerpadlo zajišťuje vytápění budovy (podlahové vytápění) a ohřev teplé užitkové vody, když vyrobené teplo z palivového článku od listopadu do února nestačí.

Rezervní nádrž na pitnou vodu o objemu 500 litrů s čističkou vody. V případě výpadku veřejného vodovodu má domácnost vodu na 3 dny včetně vody pro elektrolýzu. Systém počítá s výrobou vodíku každý letní den ze solární energie a výpadek dodávky vody může znamenat ztrátu desítek Nm³ vodíku, což může znamenat ztrátu, která vystačí na pokrytí potřeb na několik dní. [19]



Obrázek 11 - Schéma tzb systému [19]

Výrobky

Výraz „**Hydrogen ready**“ znamená kotel připravený na vodík, je takový kotel, který lze během své životnosti přeměnit na provoz 100% vodíku pomocí schválené konverzní sady. [20] [21]

Kotel připravený na vodík má schopnosti spalovat jak vodík, tak zemní plyn, aby zajistil vytápění domu či ohřev vody. Vytvořeno speciálně pro snížení emisí uhlíku. Tento výraz vznikl, když byla britská plynárenská distribuční síť připravena přejít ze zemního plynu na vodík. Kotle připravené na vodík dokážou momentálně používat směs 20 % vodíku s 80 % zemního plynu, což by pomohlo snížit uhlíkovou stopu těchto zařízení. Kotle takového typu byly úspěšně vyzkoušeny a s výsledky naznačujícími, že hořlavý plyn bude účinným palivem. Kotle připravené na vodík poskytují účinný a cenově dostupný způsob, jak mít to nejlepší z obou světů. [22] [23]

Kogenerační jednotka s palivovými články

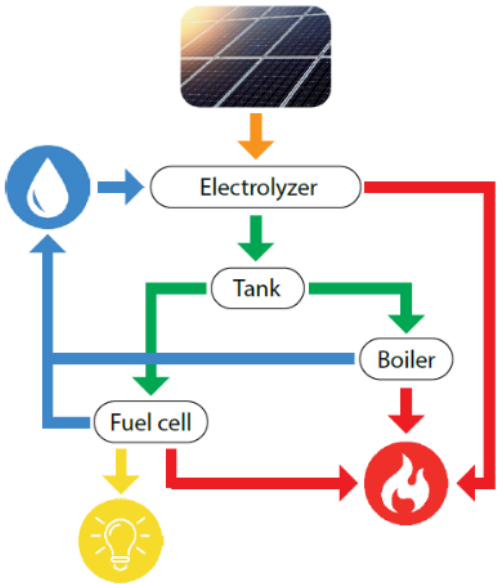
Systém KVET (Kombinovaná výroba elektřiny a tepla) s palivovými články. Kombinovaná teplárna a elektrárna (CHP) německého výrobce s obchodním názvem inhouse5000+ je založená na palivovém článku PEM. Elektrárna má elektrický výkon 4,2 kilowattů a tepelný výkon 7,5 kilowattů. Hlavní výhoda je úspora nákladů na energie a emisi CO2. Díky své dobré modulační schopnosti lze elektrický výkon podle potřeby nastavit mezi 2,5 a 4,2 kW a umožňuje nepřetržitý provoz i v létě. Účinnost výroby elektrické energie je přibližně 34 %. V kogenerační jednotce se ze zemního plynu vyrábí vodík k výrobě elektrické energie. Kyslík a vodík spolu reagují v řízeném procesu – nazývá se to také studené spalování – a produkty jsou voda, elektrická energie a teplo, které se využívají např. pro vytápění a přípravu teplé vody. Výsledkem jsou výrazně nižší emise CO2, jemného prachu, sazí nebo oxidu siřičitého. [24] [16]

Plynový kondenzační kotel na čistý vodík

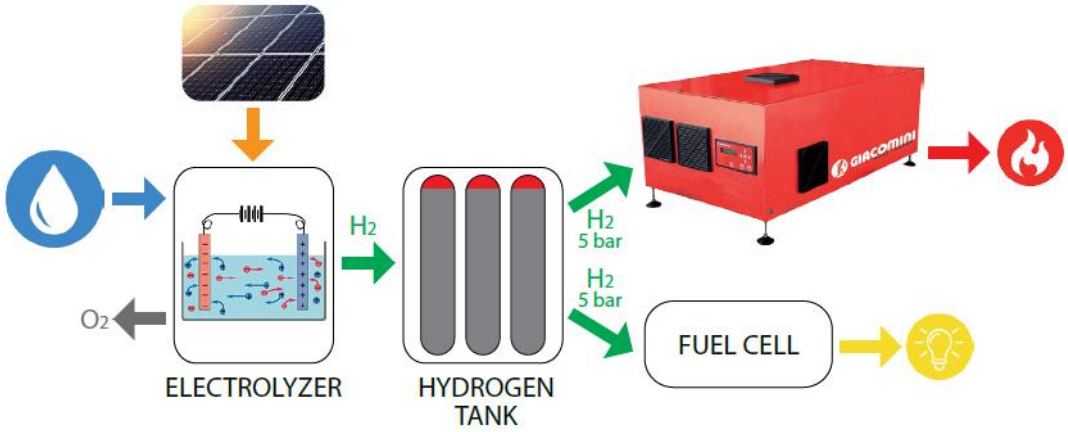
Plynový kondenzační kotel poháněný čistým vodíkem s obchodním názvem H_2ydroGEM od výrobce Giacomini z roku 2018. V kotli se nachází katalytická spalovací komora, ve které se v každém rohu přivádí látka. Z tohoto důvodu proces probíhá při relativně nízké teplotě. Je navržen pro ohřev vody v otopných soustavách s účinností se sálavým vytápěním na nízkoteplotní vodu o teplotě cca 35÷40 °C.

Katalytická reakce je ve skutečnosti bez emisí CO_2, protože uhlík se nenachází mezi činidly a protože teplota nikdy nepřekročí 300 °C. Proto tak nedochází k tvorbě škodlivých oxidů dusíku (NOx). Jediným odpadem vzniklým při této reakci je vodní pára, která částečně kondenzuje. Díky bezplamenné katalytické reakci vyžaduje kotel oproti tradičním modelům méně servisních zásahů, čímž se prodlužuje jeho životnost.

Jmenovitý tepelný výkon: 5,01 kW
Max. užitečný tepelný výkon 5,36 kW
Max. užitečná tepelná energetická účinnost: 106,7% [25]



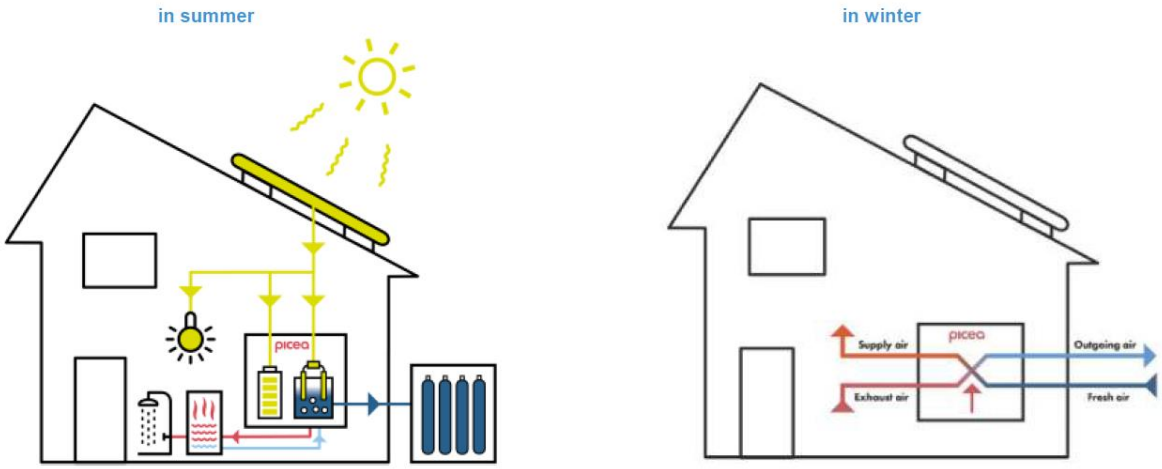
Obrázek 12 - Schéma fungování kondenzačního kotle [25]



Obrázek 13 - Schéma zapojení kondenzačního kotle [25]

Kompaktní jednotka pro rodinný dům

Jedná se o systémové řešení od výrobce HomePowerSolution pro rodinné domy s vnitřní jednotkou, ve které je umístěno: bateriové úložiště, měnič, ventilátor, palivový článek, elektrolyzér, střídač a ovládací jednotka. Dále venkovní jednotka, kde se nachází tlakové nádoby pro ukládání vodíku. Vzniklé teplo je v létě využíváno pro ohřev vody a v zimě zdroj ohřevu vzduchu ve VZT jednotce. Princip fungování je patrný z následujících schémat. Zavádějící je zatím cena, které je 85.00-125.000€ a 500€/ročně za servis. [26]



Obrázek 14 - Provoz zařízení léto/zima [26]

Obrázek 15 - Schéma zařízení včetně jeho komponentů [26]

Domácí vodíková baterie

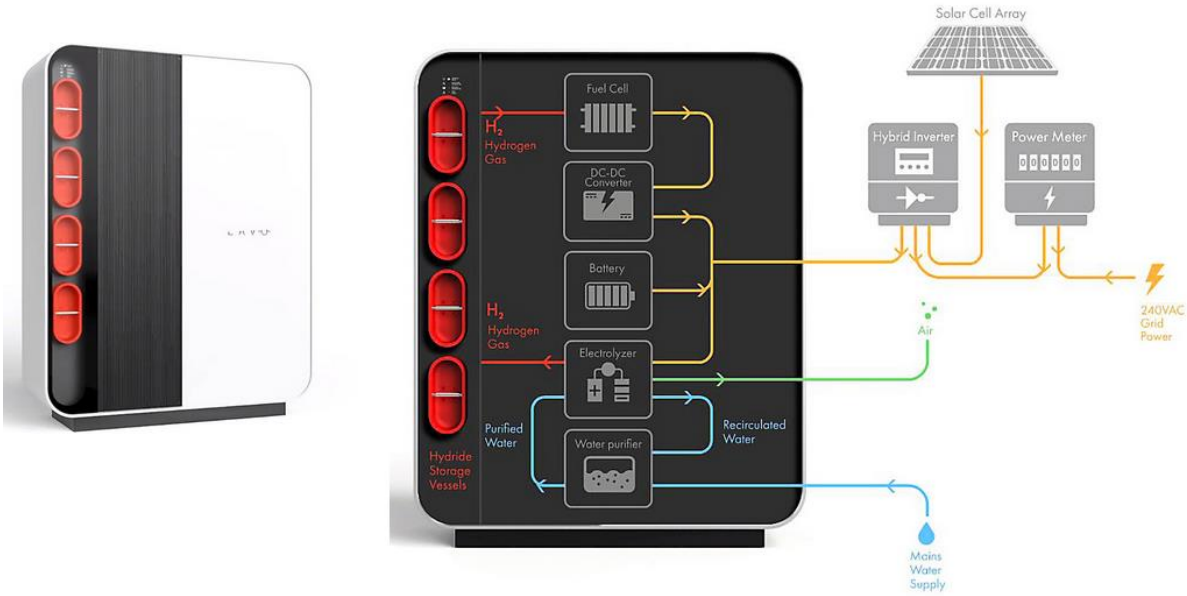
Systém slouží k poskytnutí energie pro dvoudenní potřebu průměrného domu. Domácí vodíkové baterie LAVO mohou poskytnout 40 kWh ekologického úložiště energie. To je 3x větší výkon než u li-ion baterie Tesla Powerwall [27] a jediným vedlejším produktem této vodíkové baterie je teplo a voda.

Baterie tedy vyrábí vodík z vody pomocí elektrolyzéru, následně vyrobenou energii uchovává do vodíku v patentovaných metal hydridových jednotkách a na příkaz systému jej prostřednictvím palivového článku převádí zpět na střídavý proud.

Systémové řešení stojí kolem 29 450 USD (750 000,- Kč).

Baterie je o rozměrech 1680 x 1240 x 400 mm a hmotností 196 kg.

Zpáteční účinnost jednotky je přibližně 50 % v důsledku ztráty energie v procesu elektrolýzy a v palivovém článku. [28] [29]



Obrázek 16 - schéma domácí vodíkové baterie [29]

Zařízení pro výrobu demineralizované vody

Zařízení, které je vhodné zapojit do vodíkového hospodářství, a to pro úpravu vody, která je přiváděna z řadu či lokálního zdroje pitné vody. Přístroje tohoto typu se používají převážně v laboratořích, lékárnách či výrobních provozech.

Pro instalaci zařízení je potřebný přívod pitné vody a odpadní kanalizační potrubí. Zařízení nepotřebuje k svému provozu přívod elektrické energie, úprava probíhá pouze vstupní tlakem vody. Výkon se u těchto zařízení pohybuje okolo 5–15 litrů za hodinu. Výkon je závislý na tlaku a teplotě vstupní vody. V základním provedení referenčního výrobku se přístroj skládá z kombinovaného hrubého mechanického předfiltru s aktivním uhlím, jemného mechanického filtru o hrubosti 1 µm a reverzně osmotické membrány.

Zařízení je možné doplnit například o UV lampu, mikrobiální filtr, řídicí jednotku pro plně automatický provoz. V systému by měla být také zařazena tlaková či netlaková zásobní nádrž pro poskytnutí potřeby vody v případě odstávky provozu vodovodního řadu. [30]

Alternativy/konkurenti

Biometan

Biometan je obnovitelný zdroj energie, který se vyrábí z organických materiálů, jako jsou například zemědělské a potravinářské odpady, rostlinné zbytky, zvířecí trus a odpadní vody. Biometan se vyrábí prostřednictvím anaerobní digesce, což je proces, při kterém jsou organické materiály rozkládány bakteriemi za vzniku bioplynu, který se skládá převážně z metanu a oxidu uhličitého.

Jednou z největších výhod biometanu je, že využívá organické materiály, které by jinak končily na skládkách a vytvářely nebezpečné množství skleníkových plynů. Využitím těchto materiálů jako zdroje energie se tak snižuje množství odpadů a emisí skleníkových plynů, což je přínosné pro životní prostředí.

Biometan má své nevýhody, jako jsou vysoké počáteční náklady na výrobu a potřeba specifickou infrastruktury pro jeho distribuci. Hlavně díky své čistotě a udržitelnosti se biometan stává stále populárnější alternativou či náhradou fosilních paliv.

Biometan má ve srovnání s běžnými biopalivy nejnižší emise skleníkových plynů. Zejména pak pokud je produkován či vyráběn z odpadní biomasy. Oproti jiným obnovitelným zdrojům má velkou výhodou v tom, že je možná nepřetržitá výroba bez závislosti na počasí. Vyprodukovaný je možné uložit a skladovat, což je hlavní výhoda tohoto paliva. [32]

Bioplyn

Bioplyn je výsledkem anaerobního rozkladu organických materiálů, jako jsou například odpadky, zemědělské zbytky a rostlinné zbytky. Plyn produkovaný během anaerobní digesce organických materiálů a skládající se zejména z metanu (CH_4) a oxidu uhličitého (CO_2). Bioplyn může být využíván jako palivo pro vytápění a elektřinu v budovách. Jeho výroba může být levnější než vodík a využití odpadů k jeho výrobě je ekologické. Bioplyn se skládá z různých

plynů, jako jsou metan, oxid uhličitý, vodní páry, sirovodík a další v závislosti na složení vstupních organických materiálů. Jeho složení se může výrazně lišit v závislosti na zdroji, z něhož byl získán.

Na druhé straně biometan se skládá hlavně z metanu a malého množství oxidu uhličitého. Je to tedy prakticky čistý plyn a lze ho využít jako alternativu k zemnímu plynu. Hlavním rozdílem mezi biometanem a bioplynem je tedy v obsahu metanu. Zatímco bioplyn může mít různé složení a využití, biometan má přesně definované složení a lze ho využít především jako ekologicky šetrnou alternativu k fosilním palivům. Oba produkty mají své výhody a nevýhody, ale biometan se stává stále populárnější díky své čistotě a udržitelnosti. [33]

Bioplyn je produkovaný v:

- sedimenty, trávicí ústrojí (zejména u přežvýkavců)
- zemědělských prostředích, jako jsou rýžová pole, uskladnění hnoje a kejdy
- odpadovém hospodářství na skládkách odpadů (zde je označovaný jako skládkový plyn), na anaerobních čistírnách odpadních vod (ČOV) či v bioplynových stanicích

Složení bioplynu a jeho jednotlivé složky:

Methan	**40-75 %**
Oxid uhličitý	25-55 %
Vodní pára	0-10 %
Dusík	0-5 %
Kyslík	0-2 %
Vodík	0-1 %
Čpavek	0-1 %
Sulfan	0-1 %

Tabulka 1 - Složení bioplynu [%][32]

Syntetické plyny – směs plynů CO2+H2 či N+H2

Syntetickými plyny jsou obecně všechny plynné směsi obsahující vodík, které se používají při syntézní reakci. Syntetické plyny jsou směsi plynů vytvořené chemickými reakcemi, které obvykle zahrnují oxid uhličitý (CO2) a vodík (H2), nebo dusík (N2) a vodík.

V případě směsi CO2+H2 jsou tyto plyny obvykle vytvářeny reakcí CO2 s vodíkem za vysokého tlaku a teploty za použití katalyzátorů, aby se vytvořil syntetický plyn, který se skládá především z methanu (CH4), ale také z různých uhlovodíků a dalších sloučenin.

V případě směsi N2+H2 se tyto plyny obvykle vytvářejí reakcí dusíku s vodíkem za vysokého tlaku a teploty za použití katalyzátorů, aby se vytvořil amoniak (NH3), který se používá jako základní chemická látka pro výrobu hnojiv a dalších chemických sloučenin.

Syntetické plyny mají potenciál nahradit fosilní paliva a snížit emise skleníkových plynů. Využitím obnovitelných zdrojů energie pro výrobu vodíku se může syntetický plyn stát uhlíkově neutrálním zdrojem energie. [34] [35]

Dimethylether - rDME

V roce 2021 začala v Německu fungovat první čerpací stanice s dimethyletherem z obnovitelných zdrojů (rDME), která poslouží automobilce Ford v rámci projektu na vývoj vozidel, jež budou moci místo nafty spalovat 100% dimethylether.

Význam bioLPG potažmo rDME je významný především pro mobilitu. V souvislosti s nutnou výměnou nejstarších kotlů řada domácností zvažuje přechod na plyn. Dle údajů Českého statistického úřadu však není míra plynofikace všude dostatečná. Velký podíl obcí, kam není plyn zaveden, se nachází zejména ve Středočeském a Jihočeském kraji. Jako alternativa zemního plynu se při odstávce starých kotlů a přechodu na modernější zdroj vytápění stále častěji využívá LPG. V Česku topí propanem celkově asi 10 tisíc domácností. [36]

Schéma možného řešení vodíkového hospodářství

Na výrobu a využití vodíku se lze dívat dvěma pohledy, a to jako lokální výrobu pro dům či komplex budov, nebo jako centrální výrobu a následnou dodávku distribuční síti k jednotlivým odběrným místům. K využití a spotřebě vodíku muže tedy docházet v jednotlivých odběrných místech, anebo centrálně a tepelná či elektrická energie je dopravována distribuční sítí.

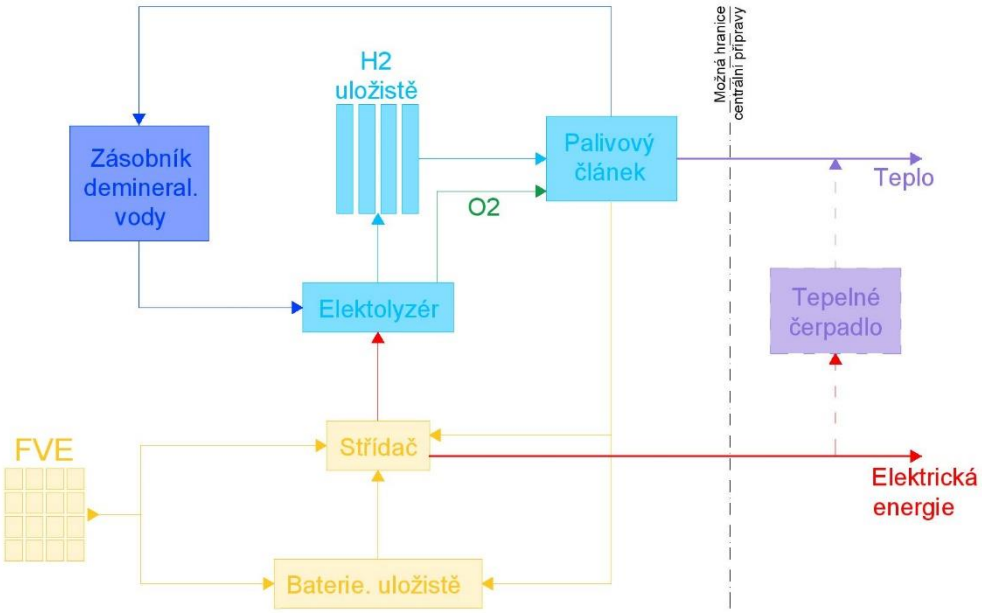
Využití palivového článku na vodík dává možnost fungování domu jako off-grid. Také je potřeba si nadefinovat ukládání vodíku a jeho následné využití, které může sloužit jak pro pokrytí denní potřeby, tak pro pokrytí sezónní potřeby domu, a pak je nutné navrhnout vhodnou sezónní akumulaci.

V těchto systémech může také hrát významnou roli tepelné čerpadlo, které výrazně zvýší účinnost celého systému. Tento princip je patrný i u zmiňovaných realizovaných projektů. Na začátku je tady potřeba si určit, jak by systém měl fungovat.

Témata typu:

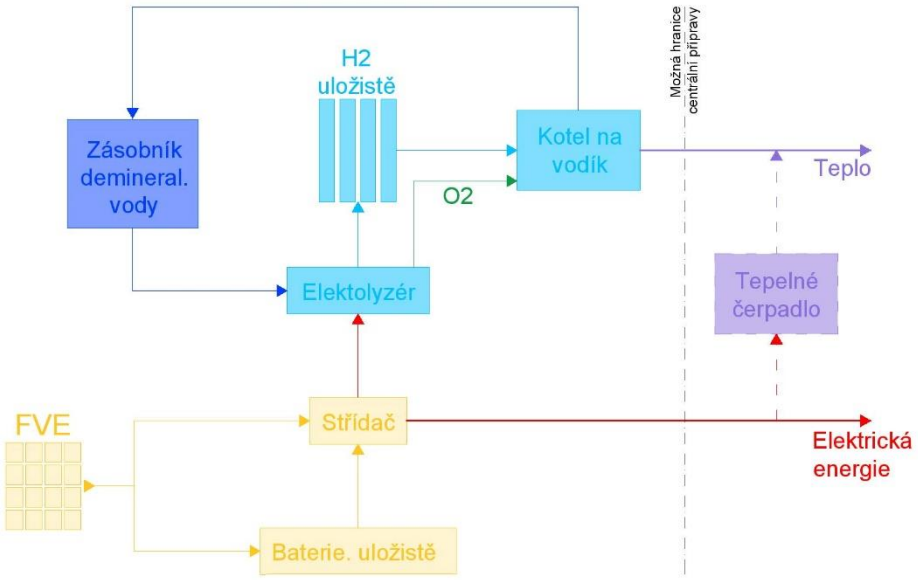
- Lokální výroba x centrální výroba pro více přípojných míst
- Lokální spotřeba x centrální výroba
- Off-grid x On-grid
- Úložiště pro denní potřebu x úložiště pro sezónní potřebu

Schéma 1.: Lokální výroba + palivový článek



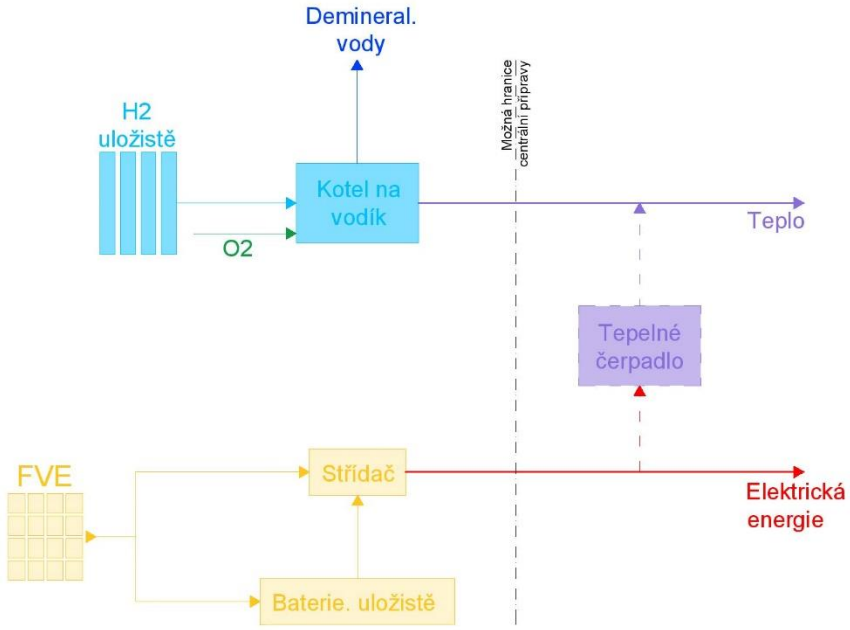
Obrázek 17- Lokální výroba + palivový článek

Schéma 2.: Lokální výroba + kotel na vodík



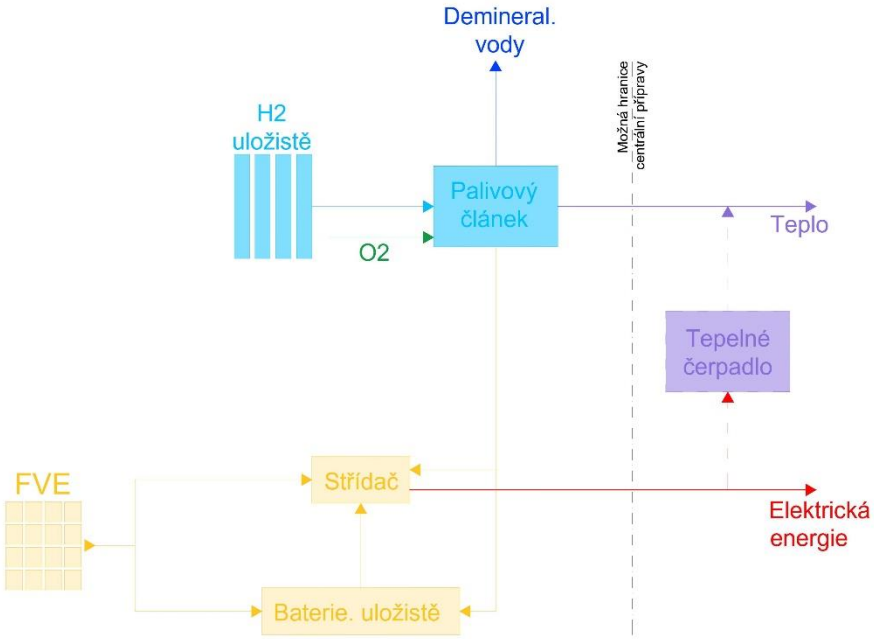
Obrázek 18 - Lokální výroba + kotel na vodík

Schéma 3.: Centrální výroba + kotel na vodík



Obrázek 19 - Centrální výroba + kotel na vodík

Schéma 4.: Centrální výroba + palivový článek



Obrázek 20 - Centrální výroba + palivový článek

Komunitní energetika

Myslím si, že stojí za zmínku i pojem komunitní energetika, který se lehce dotýká mého řešeno tématu. A to konkrétně v oblasti sdílení vyrobené či přebytečné energie ostatním obyvatelům. V mém případě je potřeba se zmínit, že pro provozování distribuční sítě a centrální budovy je potřeba nějaká instituce či autorita, která by tyto systémy provozovala. V případě, že by se majitelé rozhodili tento systém vlastnit a provozovat sami, narazí na legislativní limity.

Jedná se o kooperaci většího množství subjektů, jednotlivých spotřebitelů či společenství a orientaci primárně na environmentální, sociální a hospodářské přínosy oproti generování zisku. Využití v ČR je signifikantně limitováno opožděným procesem transponování evropských energetických směrnic. EU směrnice přináší nové koncepty jako občanská energetická společenství nebo společenství pro OZE pro překročení bariér. [37]

Výhody:

- Možnost energetické soběstačnosti a částečné nezávislosti na velkých dodavatelích
- Nižší spotřeba elektřiny, úspory z rozsahu
- Přispívá k ochraně životního prostředí
- Nižší náklady pro spotřebitele (silová i distribuční složka energie)
- V ceně elektřiny nemusí být zahrnuty poplatky za distribuci ani další regulované složky
- Neaplikuje se ekologická daň z elektřiny
- Nižší fixní platba za jistič (nesoudobost spotřeby)

Nevýhody:

- Absence legislativního rámce
- Nemožnost využití stávajících rozvodů a měřicích zařízení v domě v rámci současné právní úpravy (většinou ve vlastnictví distributora)
- Možnosti financování projektů komunitní energetiky

- Nemožnost využití lokální distribuční soustavy pro sdílení energie
- Nelze poskytnout přebytky místním spotřebitelům bez nutnosti platby distributorovi

Zákon o komunitní energetice je v České republice v procesu legislativního projednání. Byl předložen do Poslanecké sněmovny Parlamentu ČR v září 2021 jako vládní návrh zákona. Po projednání v Poslanecké sněmovně bude následovat projednání v Senátu a poté podepsání prezidentem. Pokud bude zákon schválen, vstoupí v platnost až po 15 měsících od jeho vyhlášení.

Cílem zákona o komunitní energetice je podpořit vznik a rozvoj energetických komunit, tedy sdružení občanů, kteří společně produkují, distribuují nebo spotřebovávají energii. Zákon má stanovit podmínky pro vznik a provoz energetických komunit a umožnit jim vstup na trh s elektřinou a zemním plynem.

V současné době se zákon o komunitní energetice nachází ve fázi připomínkování v Poslanecké sněmovně, kde probíhá jeho detailní projednávání a případné úpravy. Následně bude předložen k projednání v Senátu a poté k podpisu prezidentem. Zákon o komunitní energetice je tedy stále ve fázi legislativního procesu a jeho konečné schválení není zatím jisté.

Praktická část

Návrh konceptu řešení

Pro svou práci jsem si vybral komplex rodinných domů, kde bych chtěl návrhem docílit soběstačného energetického systému, který bude emisně neutrální či nulový. Návrhem bych chtěl reflektovat možné využití vodíku pro budovy či komplexy staveb. Chtěl bych, aby můj návrh dokázal vyrábět elektrickou energii v případě potřeby, hlavně v zimním období. O následném návrhu se dá uvažovat několika úhly pohledu.

Možné varianty výroby vodíku:

Vodík se dá vyrábět různými způsoby, viz kapitoly výše, nicméně já bych chtěl pro svůj koncept využít bezemisní zdroj výroby. Výrobu pomocí elektrolýzy z obnovitelných zdrojů energie. Budeme se bavit o výrobě tzv. zeleného vodíku.

Možné varianty následného využití:

Vyrobený a uskladněný vodík je možné využít pro spalování, tedy k výrobě tepla. Vodík lze spalovat buď lokálně, nebo centrálně. V případě lokálního využití je potřeba vodík dopravit k odběrným místům distribuční sítí.

Má preferovaná varianta je použití palivového článku, který dokáže vyrábět jak elektrickou energii, tak teplo. Obecně je tento poměr 1:1. V tomto případě je vhodnější centrální řešení z důvodů ceny a komplikovanosti zařízení.

Možné varianty uskladnění vodíku:

Vodík a jeho následné využití je možné buď pro denní potřeby komplexu, nebo pro sezónní využití. V případě sezónního využití je potřeba velkého množství prostoru pro uskladnění vodíku, což výrazně zvyšuje cenu daného systému, ale je to nezbytné v případě uvažovaného soběstačného provozu.

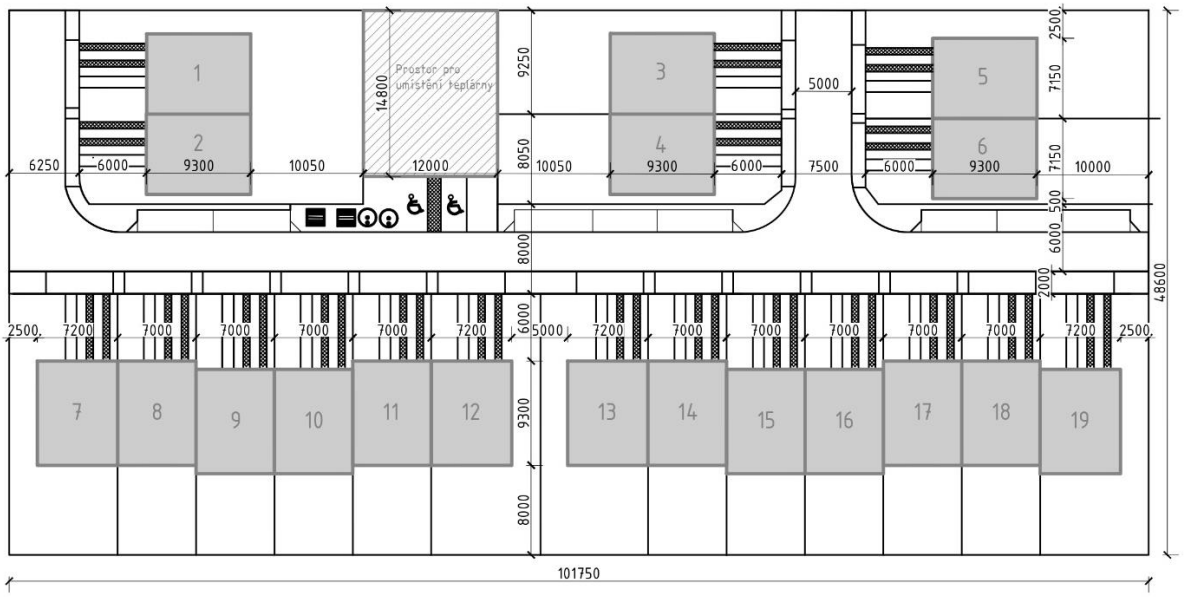
Základní informace o navrhované komplexu

Lokalita: okres Nový Jičín, blíže nespecifikováno

Plocha řešeného území: 4 950 m^2

Navržená zástavba: 6x rodinný dvojdům, 13x řadový dům
celkem 19 rodinných domů

Komplex domů jsem zjednodušeně znázornil v následující situace s použitím normových odstupových vzdálenosti. V situaci je naznačen prostor pro umístění mikro teplárny. Tato plocha je o velikosti 177,6 m^2.



Obrázek 21 - situační výkres 1:600

Nejprve je potřeba si nadefinovat vstupní hodnoty pro následný návrh, tedy předběžné potřeby komplexu.

Stavebně-technické vlastnosti objektů

Předpokládané parametry rodinných domů:

Podlažnost: 1.NP + 2.NP

Užitná plocha: 51,5 + 51,5 m^2

Založení: základové pasy z prostého betonu

Vodorovné nosné konstrukce: přepjaté železobetonové panel

Svislé nosné konstrukce: Vápenopískové tvárnice + tepelné izolace

Krov: příhradový vazník (bez obytného podkroví)

Větrání: Mechanické nucené větrání uvažováno s účinností 85%

Typy objektu: Typ 1: č. objektu 8-11 + 14-18

Typ 2: č. objektu 2,3,6,7,13

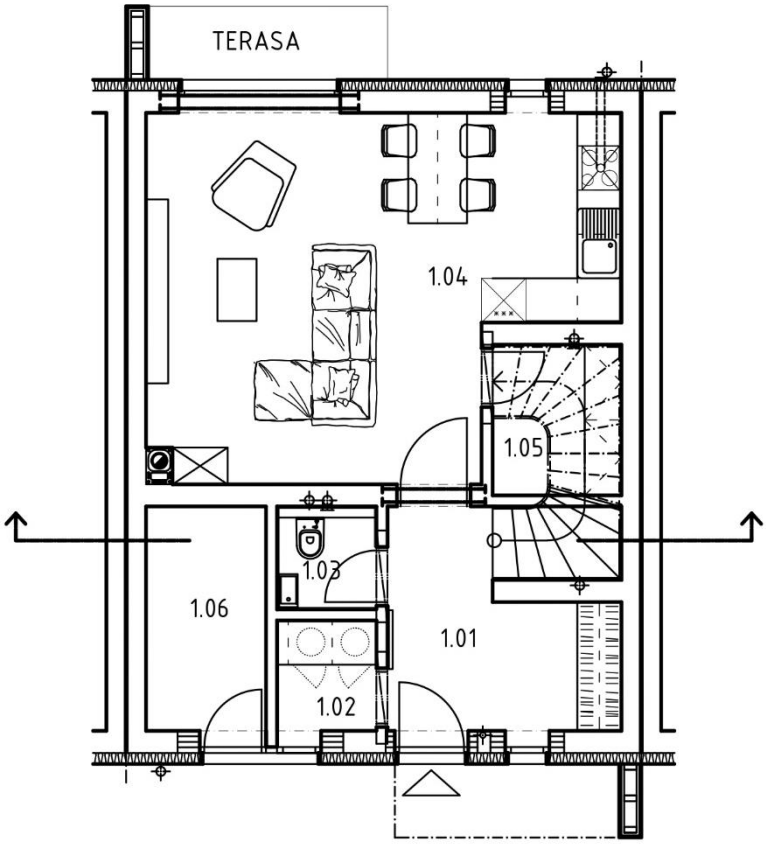
Typ 3: č. objektu 1,4,5,12,19

Součinitelé prostupů tepla jednotlivých konstrukcí byly uvažovaný v doporučených hodnotách pro pasivní standard.

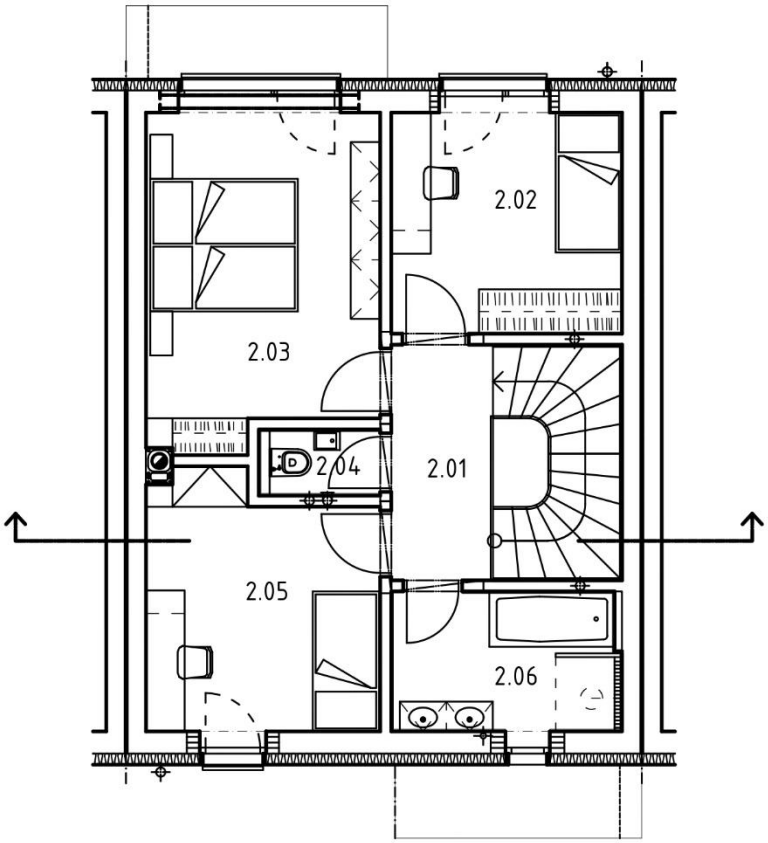
Typ konstrukce	Rsi	Rse	R	U [W/m2.K]	Doporuč. [W/m2.K]	Pasiv. [W/m2.K]
Podlaha na terénu	0,17	0	3,82	0,2	0,3	0,22
strop 1NP/2NP	0,17	0,17	2,71	0,37	1,45	-
Střecha	0,04	0,10	8,10	0,12	0,16	0,15
Obvodová stěna	0,04	0,13	5,75	0,15	0,25	0,18
Vnitřní stěna	0,13	0,13	0,81	1,23	-	-
Okna				0,9	1,2	0,7
Dveře				1,2	1,2	0,9
Dělící stěna mezi domy	0,13	0,13	1,76	0,40	0,7	0,5
Interiérové dveře				3,00		

Tabulka 2 - Součinitelé prostupu tepla

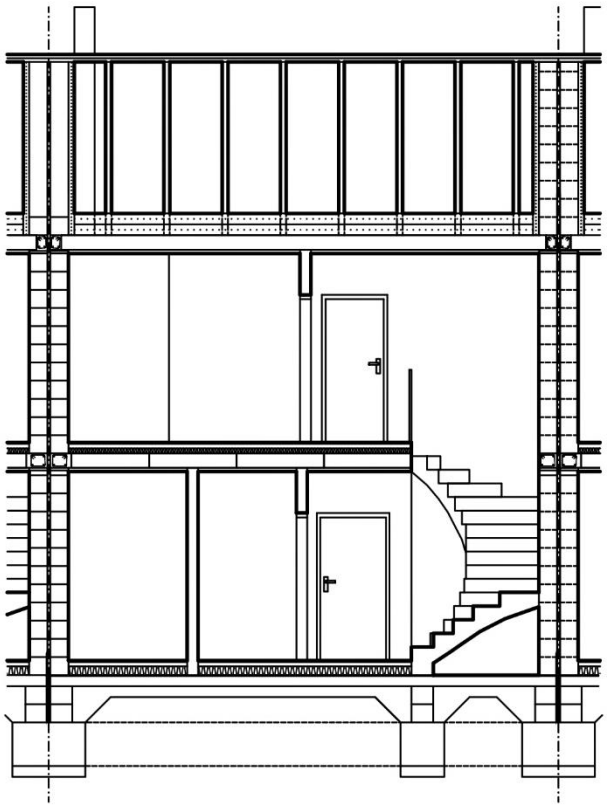
Všechny domy jsou dispozičně stejné, liší se pouze svou pozicí. Krajní domy budou mít logicky větší ztrátu. A také plochu fasády pro přidanou o teplenou izolaci.



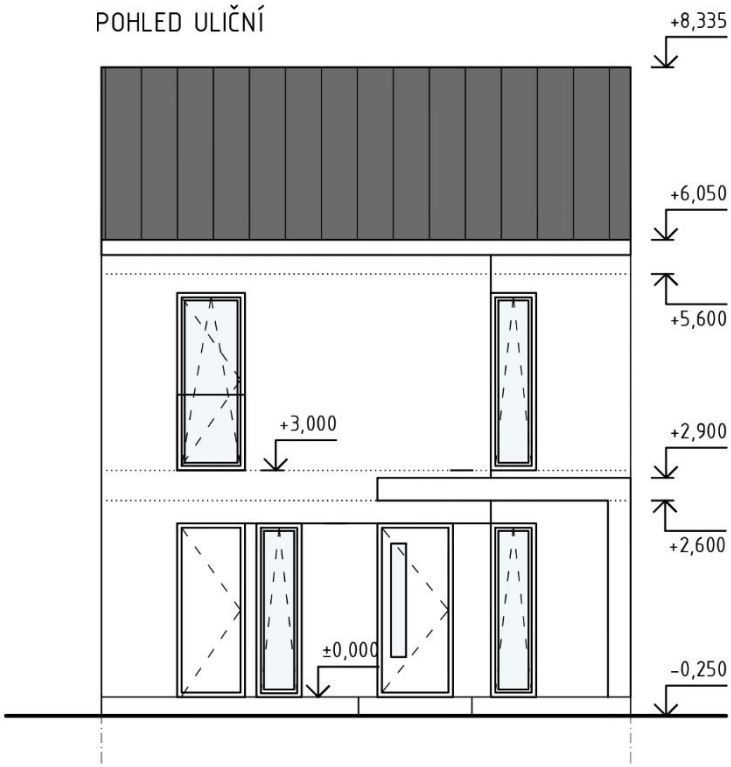
Obrázek 22 - Půdorys 1.NP 1:100



Obrázek 23 - Půdorys 2.NP 1:100



Obrázek 24 - Příčný řez 1:100



Obrázek 25 - uliční pohled 1:100

Tepelná ztráta objektů dle ČSN EN 12 831-1

Návrhová tepelná ztráta větráním se ZZT

$$\Phi_{V,i} = H_{V,i} \cdot (\theta_{int,i} - \theta_e) = V_i \cdot n_{min,i} \cdot \rho \cdot c \cdot (\theta_{int,i} - \theta_e) \cdot (1 - \eta_{ZZT})$$

Označení	Druh	Podlaží	Objem m3	Teplota °C	Intenzita větrání -	Hv,i [W/K]
1.01	Zádveří	1NP	25,4	18	0,3	0,4
1.02	Technická místnost	1NP	5,54	18	0,3	0,1
1.03	WC	1NP	4,91	18	1,0	0,2
1.04	Obývací pokoj + KK	1NP	75,35	22	0,5	1,9
1.05	Spíž	1NP	9,33	15	0,3	0,1
1.06	Sklad	1NP	13,44	15	0,3	0,2
						0,0
2.01	Hala se schodištěm	2NP	30,68	22	0,3	0,5
2.02	Pokoj	2NP	24,41	22	0,5	0,6
2.03	Ložnice	2NP	36,01	22	0,5	0,9
2.04	Samostatné WC	2NP	3,85	18	1,0	0,2
2.05	Pokoj	2NP	26,94	22	0,5	0,7
2.06	Koupelna	2NP	15,26	24	1,0	0,8
						6,6

Tabulka 3 - tepelná ztráta větráním

Tepelná ztráta objektu Typ 1:

Označení	Druh	Podlaží	Teplota [°C]	Ht,ie [W/K]	Hv,i [W/K]	$Q_{H,ht}$ [W]
1.01	Zádveří	1NP	18	256,79	13,47	270
1.02	Technická místnost	1NP	18	108,83	2,94	112
1.03	WC	1NP	18	23,01	8,68	32
1.04	Obývací pokoj + KK	1NP	22	869,76	74,20	944
1.05	Spíž	1NP	15	-102,30	4,52	0
1.06	Sklad	1NP	15	65,46	6,52	72
2.01	Hala se schodištěm	2NP	22	159,16	18,13	177
2.02	Pokoj	2NP	22	259,14	24,04	283
2.03	Ložnice	2NP	22	371,47	35,46	407
2.04	Samostatné WC	2NP	18	-68,26	6,80	0
2.05	Pokoj	2NP	22	235,20	26,53	262
2.06	Koupelna	2NP	24	207,23	31,60	239
				2386	253	**2798**

Tabulka 4 - Tepelná ztráta prostupem + větrání 1

Tepelná ztráta objektu Typ 2:

Označení	Druh	Podlaží	Teplota [°C]	Ht,ie [W/K]	Hv,i [W/K]	$Q_{H,ht}$ [W]
1.01	Zádveří	1NP	18	302,78	13,47	316
1.02	Technická místnost	1NP	18	108,83	2,94	112
1.03	WC	1NP	18	23,01	8,68	32
1.04	Obývací pokoj + KK	1NP	22	913,31	74,20	988
1.05	Spíž	1NP	15	-68,19	4,52	0
1.06	Sklad	1NP	15	65,46	6,52	72
2.01	Hala se schodištěm	2NP	22	232,76	18,13	251
2.02	Pokoj	2NP	22	298,14	24,04	322
2.03	Ložnice	2NP	22	371,47	35,46	407
2.04	Samostatné WC	2NP	18	-68,26	6,80	0
2.05	Pokoj	2NP	22	235,20	26,53	262
2.06	Koupelna	2NP	24	229,96	31,60	262
				2644	253	**3022**

Tabulka 5 - Tepelná ztráta prostupem + větrání 2

Tepelná ztráta objektu Typ 3:

Označení	Druh	Podlaží	Teplota [°C]	Ht,ie [W/K]	Hv,i [W/K]	$Q_{H,ht}$ [W]
1.01	Zádveří	1NP	18	256,79	13,47	270
1.02	Technická místnost	1NP	18	108,83	2,94	112
1.03	WC	1NP	18	23,01	8,68	32
1.04	Obývací pokoj + KK	1NP	22	935,41	74,20	1010
1.05	Spíž	1NP	15	-102,30	4,52	0
1.06	Sklad	1NP	15	116,22	6,52	123
2.01	Hala se schodištěm	2NP	22	159,16	18,13	177
2.02	Pokoj	2NP	22	259,14	24,04	283
2.03	Ložnice	2NP	22	430,62	35,46	466
2.04	Samostatné WC	2NP	18	-68,26	6,80	0
2.05	Pokoj	2NP	22	278,75	26,53	305
2.06	Koupelna	2NP	24	207,23	31,60	239
				2605	253	**3017**

Tabulka 6 - Tepelná ztráta prostupem + větrání 3

Tepelná ztráta celého komplexu:

OZN.	Počet	Ztráta větráním [W/K]	Ztráta prostupem [W/K]	Tepelná ztráta[kW]
Typ 2	5	253	2644	3,02
Typ 3	5	253	2605	3,02
Typ 1	9	253	2386	2,80
Celkem	19	4805	47715	**55,37 kW**

Tabulka 7 - Tepelná ztráta komplexu

Potřeba tepla pro vytápění dle ČSN EN ISO 13 790

Měsíc	Počet dnů	Počet hod	Střední venkovní teplota	Měrný tepelný tok prostupem celé budovy	Potřeba tepla prostupem	Měrný tepelný tok větráním celé budovy	Potřeba tepla větráním	Celková potřeba tepla	Vnitřní tepelné zisky	Solární tepelné zisky	Celkové tepelné zisky	Bilanční poměr pro režim vytápění	Faktor využitelnosti tep. zisků pro vytápění	Redukční faktor na přerušené vytápění	Potřeba tepla	
	n	n_{hod}	t_{ep}	H_T	$Q_{H,tr}$	H_V	$Q_{H,ve}$	$Q_{H,nt}$	$Q_{H,int}$	$Q_{H,sol}$	$Q_{H,gn}$	γ_H	$n_{H,gn}$	$a_{H,red}$	$Q_{H,nd}$	
	[den]	[hod]	[°C]	[W/K]	[kWh]	[W/K]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[-]	[-]	[-]	[kWh]	
Leden	31	744	-2,6	65,02	1138,7	6,60	115,6	1254	282,7	1363,9	1647	1,313	0,446	1	519	
Únor	28	672	-1,3		971,7		98,6	1070	255,4	2240,4	2496	2,332	0,309		300	
Březen	31	744	2,9		872,6		88,6	961	282,7	4448,7	4731	4,922	0,172		145	
Duben	30	720	7,7		619,8		62,9	683	273,6	6369,9	6643	9,732	0,095		55	
Květen	31	744	12,8		393,7		40,0	434	282,7	8464,3	8747	20,169	0,048		17	
Červen	30	720	15,9		235,9		23,9	260	273,6	8618,1	8892	34,220	0,029		6	
Červenec	31	744	17,2		180,9		18,4	199	282,7	8386,5	8669	43,514	0,023		3	
Srpen	31	744	16,8	pozn. Aritmetický průměr z celkového počtu budov	200,2		20,3	221	282,7	7608,6	7891	35,782	0,027		5	
Září	30	720	13,3		357,6		36,3	394	273,6	5365,7	5639	14,316	0,066		21	
Říjen	31	744	8,2		616,2		62,6	679	282,7	3385,2	3668	5,404	0,159		94	
Listopad	30	720	3,2		830,4		84,3	915	273,6	1200,5	1474	1,612	0,395		333	
Prosinec	31	744	-0,4		1032,3		104,8	1137	282,7	759,3	1042	0,916	0,539		576	
Lokalita	Nový Jičín													Celkem 1 objekt	2074	kWh
														Celkem celý komplex	39,40	MWh

Faktor využitelnosti tep. zisků pro vytápění	Redukční faktor na přerušené vytápění	Potřeba tepla
$n_{H,gn}$	$a_{H,red}$	$Q_{H,nd}$
[-]	[-]	[kWh]
0,446	1	519
0,309		300
0,172		145
0,095		55
0,048		17
0,029		6
0,023		3
0,027		5
0,066		21
0,159		94
0,395		333
0,539		576
Celkem 1 objekt		2074 kWh
Celkem celý komplex		39,40 MWh

Tabulka 8 - Potřeba tepla s tepelnými zisky

r	Faktor využitelnosti tep. zisků pro vytápění	Redukční faktor na přerušené vytápění	Potřeba tepla
	$n_{H,gn}$	$a_{H,red}$	$Q_{H,nd}$
	[-]	[-]	[kWh]
	0,516	1	1254
	0,516		1070
	0,516		961
	0,516		683
	0,516		434
	0,516		260
	0,516		199
	0,516		221
	0,516		394
	0,516		679
	0,516		915
	0,516		1137
	Celkem 1 objekt		8206 kWh
	Celkem celý komplex		155,92 MWh

Tabulka 9 - Potřeba tepla bez tepelných zisků

Z tabulky vyplívá, že ve výpočtu hrají velkou roli tepelné zisky, respektive jejich započítávání do roční bilance.

Potřeba tepla pro přípravu teplé vody

Pro stanovení těchto hodnot se nedoporučuje používat údaje o potřebě TV z normy ČSN 06 0320 – Ohřívání užitkové vody – Navrhování a projektování. Reálné hodnoty jsou zhruba poloviční.

Stanovení potřebného výkonu pro ohřev TV pro jeden rodinný dům zohledňující přednostní přípravu TV. Daný postup vychází z bilance času potřebného k dohřátí TV s využitím jmenovitého tepelného výkonu zdroje tepla. Tento návrh je vhodný použít pro rodinné domy. [38]

$Q_k \geq Q_{TV}$, Tepelný výkon kotle > požadovaný výkon pro ohřev TV

$$Q_k = \frac{V_{TV} \cdot y \cdot \rho \cdot c \cdot X_p}{\tau_a} = \frac{0{,}12x0{,}94x999{,}7x4180x10}{1200} = 3928\ W = \mathbf{3{,}9\ kW}$$

Q_{TV} - tepelný výkon nutný k dohřevu TV [W]

V_{TV} - objem zásobníku TV [m^3]

τ_a - doba ohřevu TV při teplotním rozdílu pro dohřev TV [s]

ρ - hustota vody při střední teplotě zásobníku [kg/m^3]

c - měrná tepelná kapacita vody při střední teplotě zásobníku [J/(kg.K)]

X_p - spínací diference pro dohřev TV (5 nebo 10 K) [K]

y - korekční faktor odběru tepla ze zásobníku TV [-]

Denní potřeba pro jeden rodinný dům.

$V_{TV} = V_{2P} \cdot n_i$, = 30 x 4 = 120 l

V_{P2}=20-40 l/osoba.den dle ČSN EN 15316-3-1

n=počet osob

Při instalaci pasivní akumulace 10 až 25 l/byt (4 osoby) pro snížení odběrového výkonu:

$$Q_{W,max} = 5{,}75 \cdot p^{0{,}65}$$

$$Qw, max = 5{,}75x4^{0{,}65} = \mathbf{14{,}16\ kW}$$

Roční potřeba tepla na ohřev TV dle ČSN 06 0320:

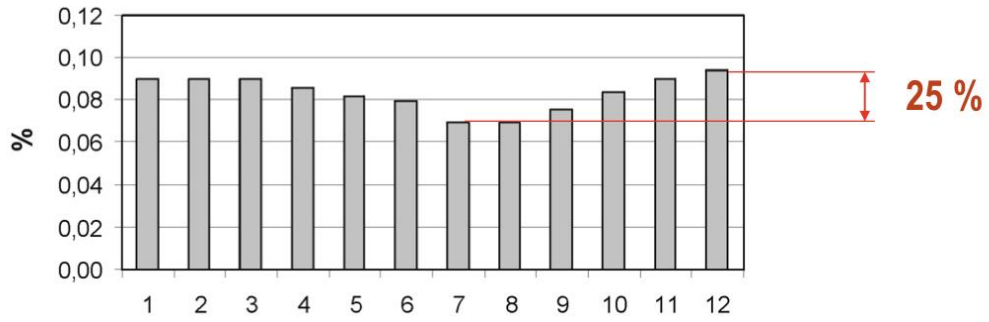
$$Q_W = \frac{V_{TV,den} \cdot 365 \cdot \rho \cdot c \cdot (t_{TV} - t_{SV})}{3{,}6 \times 10^6}$$

$$Qw = \frac{0{,}12x365x998x4187x(60-15)}{3{,}6x10^6} = \mathbf{2288\ kWh/rok}$$

$$Qw,s = \frac{Qw,rok}{365x24} = \frac{1907}{365x24} = \mathbf{0{,}26\ kW}$$

Roční potřeba tepla pro ohřev TV bude dále použit z nástroje NKN.

V letním období dochází k poklesu spotřeby od zimního období. Tyto výkyvy se pohybují okolo 25%. Ve výpočtu jsem tyto výkyvy zanedbal.



Obrázek 26 - roční výkyvy potřeby tepla na ohřev TV [39]

Energetické bilance pomocí nástroje NKN

Budova v tomto nástroji hodnocena jako budova s téměř nulovou spotřebou energie pro 2022. Budova je řešena jako jedna zóna.

Do výpočtu nebyli započteny žádné PV systémy. V dalším kroku bude potřeba výkon těchto systémů stanovit a přejít k návrhu FVE systému. Pro tento krok je potřeba si nejprve stanovit měsíční potřeby komplexu.

C.2. Energetická bilance na úrovni systémů podle požadavků vyhlášky 264/2020 Sb.				
	Parametr	**jednotky**	**Hodnocená budova**	**Referenční budova**
Obecně - ukazatele energetické náročnosti				
Celková dodaná energie	Q_{del}	kWh/rok	**7 371**	12 668
Neobnovitelná primární energie	EnP	kWh/rok	**9 668**	10 029
Celková primární energie	EP	kWh/rok	**7 984**	-
Dílčí dodaná energie, neobnovitelná primární energie				
Dílčí dodaná energie na vytápění	E_H	kWh/rok	**3 623**	8 382
Neobnovitelná primární energie na vytápění	EnP_H		**3 499**	5 401
Dílčí dodaná energie na chlazení	E_C	kWh/rok	**0**	0
Neobnovitelná primární energie na chlazení	EnP_C		**0**	0
Dílčí dodaná energie na větrání	E_V	kWh/rok	**709**	654
Neobnovitelná primární energie na větrání	EnP_V		**1 842**	1 063
Dílčí dodaná energie na přípravu teplé vody	E_W	kWh/rok	**2 198**	2 438
Neobnovitelná primární energie na přípravu TV	EnP_W		**2 139**	1 620
Dílčí dodaná energie na osvětlení	E_L	kWh/rok	**842**	1 195
Neobnovitelná primární energie na osvětlení	EnP_L		**2 188**	1 945
Produkce energie				
Produkce energie solárním systémem	E_{sol}	kWh/rok	**0**	0
Produkce energie PV systémem	E_{PV}	kWh/rok	**0**	0
Vypočtená spotřeba energie				
Vypočtená spotřeba energie na vytápění	Q_H	kWh/rok	**3 510**	8 224
Vypočtená spotřeba energie na chlazení	Q_C	kWh/rok	**0**	0
Vypočtená spotřeba energie na větrání	Q_V	kWh/rok	**709**	654
Vypočtená spotřeba energie na přípravu TV	Q_W	kWh/rok	**2 103**	2 343
Vypočtená spotřeba energie na osvětlení	E_L	kWh/rok	**842**	1 195
Pomocná energie				
Pomocná energie pro vytápění	$W_{H,aux}$	kWh/rok	**113**	157
Pomocná energie pro chlazení	$W_{C,aux}$	kWh/rok	**0**	0
Pomocná energie pro větrání	$W_{V,aux}$	kWh/rok	**105**	105
Pomocná energie pro Přípravu TV	$W_{W,aux}$	kWh/rok	**95**	95

Tabulka 10 - Energetická bilance z NKN

C.3 Hodnocená budova - Dílčí dodaná energie Dílčí dodaná energie													
	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec	**Celkem**
Vytápění	1 031	649	301	33	0	0	0	0	0	91	585	932	**3 623**
Chlazení	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**0**
Větrání	60	54	60	58	60	58	60	60	58	60	58	60	**709**
Příprava teplé vody	184	178	184	182	184	182	184	184	182	184	182	184	**2 198**
Osvětlení	83	72	72	66	64	62	63	64	67	72	75	82	**842**
Celkem	**1 359**	**953**	**618**	**339**	**309**	**302**	**308**	**309**	**307**	**408**	**901**	**1 259**	**7 371**
Započitatelná produkce energie:													
PV systém - export	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**0**
Termické solární kolektory	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**0**

Tabulka 11 - Dílčí dodaná energie z NKN

Potřebné energie pro navrhovaný komplex

Potřebné energie jsou vztaženy především k dodávce tepla a elektrické energie. Do potřeb elektrické energie jsou započítány vzduchotechnické jednotky, pomocná čerpadla či energie pro elektrické zařízení v domech.

Žlutě jsou v tabulce značeny hodnoty z nástroje NKN a modře hodnoty stanoveny výpočtem, viz výše.

Potřeba energie jednoho rodinného domu:

Typ energie	Roční potřeba energie [kWh/rok]		Potřebné výkony [W]
Teplo - vytápění	**3623**	2074	2 946
Teplo - ohřev TV	2198	**2288**	2 900
Teplo celkem	**5911**		5 846
Elektrická energie	**1863**		---

Tabulka 12 - Potřeby energie RD

Potřeba energie pro celý komplex:

Typ energie	Roční potřeba energie [MWh/rok]		Potřebné výkony [kW]
Teplo - vytápění	**68,84**	39,40	55,37
Teplo - ohřev TV	41,76	**43,47**	55,1
Teplo celkem	**112,31**		110,47
Elektrická energie	**35,397**		---

Tabulka 13 - Potřeby energie komplexu

Měsíční potřeby energie pro celý komplex [kWh/rok]

Typ energie	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec
Teplo - vytápění	19589	12331	5719	627	0	0	0	0	0	1729	11115	17708
Teplo - ohřev TV	7338	6843	7338	7179	7338	7179	7338	7338	7179	7338	7179	7338
Teplo celkem	**26927**	**19174**	**13057**	**7806**	**7338**	**7179**	**7338**	**7338**	**7179**	**9067**	**18294**	**25046**
Elektrická energie	**2950**	**2950**	**2950**	**2950**	**2950**	**2950**	**2950**	**2950**	**2950**	**2950**	**2950**	**2950**

Tabulka 14 - Měsíční potřeby energie komplexu

Stanovení přípojného výkonu

Tento parametr slouží k následnému návrh distribuční sítě a stanovení potřebného výkonu.

$$\dot{Q}_P = 0{,}8 \times \dot{Q}_H + \dot{Q}_{W,s}$$

1. podmínka $\dot{Q}_P \geq \dot{Q}_H$
2. podmínka $\dot{Q}_P \geq \dot{Q}_{W,max}$

obě podmínky musí být splněny
jinak $\dot{Q}_P = \max\left(\dot{Q}_H ; \dot{Q}_{W,max}\right)$

$Qp = 0{,}8x68{,}84 + 0{,}26x19 = 60{,}01\ kW$

$Qw, max = 14{,}16\ kW$

$\boldsymbol{Q_H = 68{,}84\ kW}$ = hodnota pro přípojný výkon

Q_H tepelný výkon pro krytí tepelné ztráty [kW]

$Q_{W,s}$ střední hodnota tepelného výkonu pro ohřev vody [kW]

$Q_{W,max}$ tepelný výkon ohříváků [kW]

Přípojný výkon pro jeden rodinný dům:

$Qp = 0{,}8x3{,}62 + 0{,}26x1 = 3{,}16\ kW$

$Qw, max = 0{,}75\ kW$

$\boldsymbol{Q_H = 3{,}62\ kW}$ = hodnota pro přípojný výkon

Energetické schéma systému

Pro schéma bylo využito předpokladu, že bude na každém z navrhovaných domů umístěna fotovoltaická elektrárna, která bude mít centrální bateriové úložiště. V každém domě bude umístěn střídač/měnič, který převede vyrobenou energie ze stejnosměrné na střídavou.

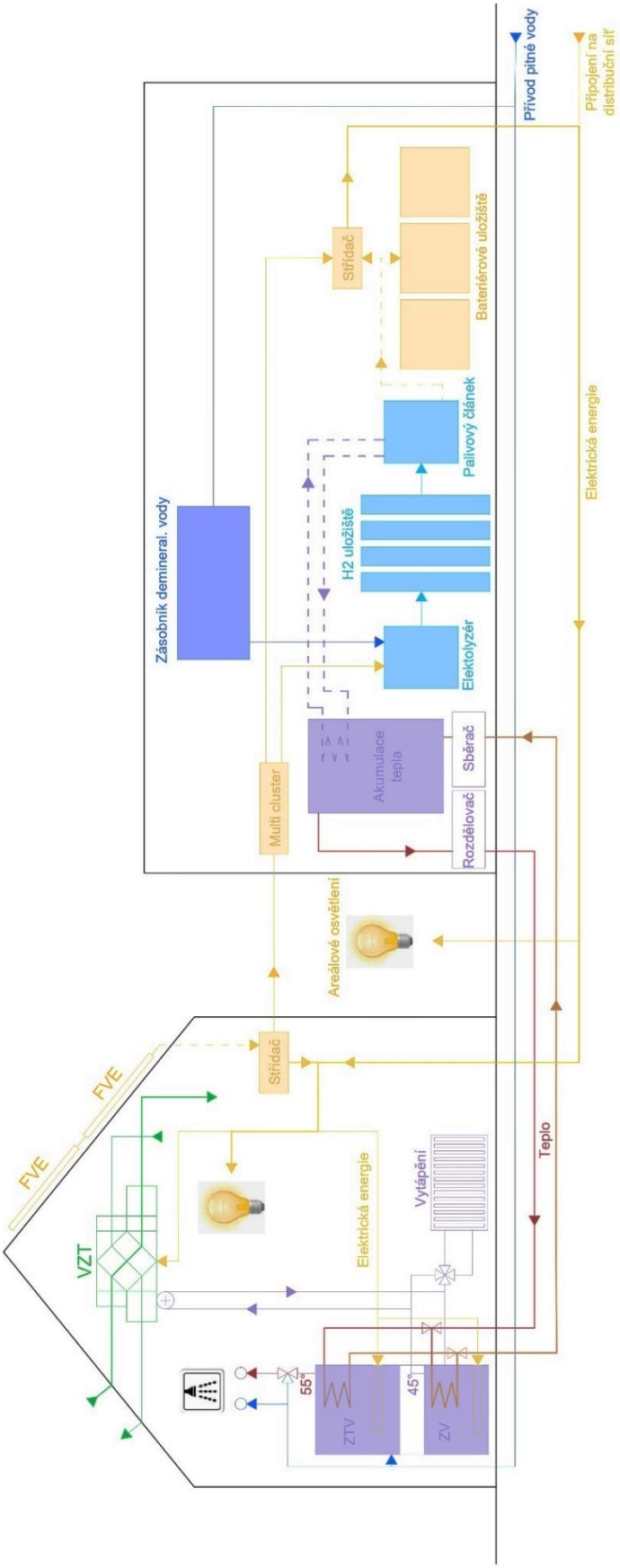
Varianta 1: Přebytečná energie bude částečně použita pro ohřev otopné a teplé užitkové vody. Tento ohřev pomocí elektrických patron bude přispívat k ohřevu přibližně 20%. Zbytek přebytečné energie bude přiveden do centrální budovy, kde bude uložena do bateriového uložiště, v případě plné kapacity bude energie využita pro výrobu vodíku.

Varianta 2: Přebytečná elektrická energie bude použita pro provoz tepelného čerpadla, které bude vyrobené teplo akumulovat do otopné vody v akumulačních zásobnících v centrální budově. Zbytek přebytečné energie bude uložen do bateriového uložiště, v případě plné kapacity bude energie využita pro výrobu vodíku.

Potřebné množství vodíku bude vyráběno pomocí elektrolyzéru z přebytečné vyrobené elektrické energie. Vyrobený vodík bude centrálně uložen. Velikost zásoby bude odpovídat sezónnímu zásobníku pro potřeby komplexu hlavně v zimní období. Dimenze bude navržena tak, aby komplex nepotřeboval žádnou elektrickou energie ze sítě. Nicméně komplex bude připojen na lokální distribuční síť z důvodů výpadku či závadě navrhovaného systému. Pro elektrolyzér bude navržen také zásobník demineralizované vody, které bude o velikosti potřeb komplexu na 2-3 dny, v případně přestávky dodávky pitné vody z veřejného řadu.

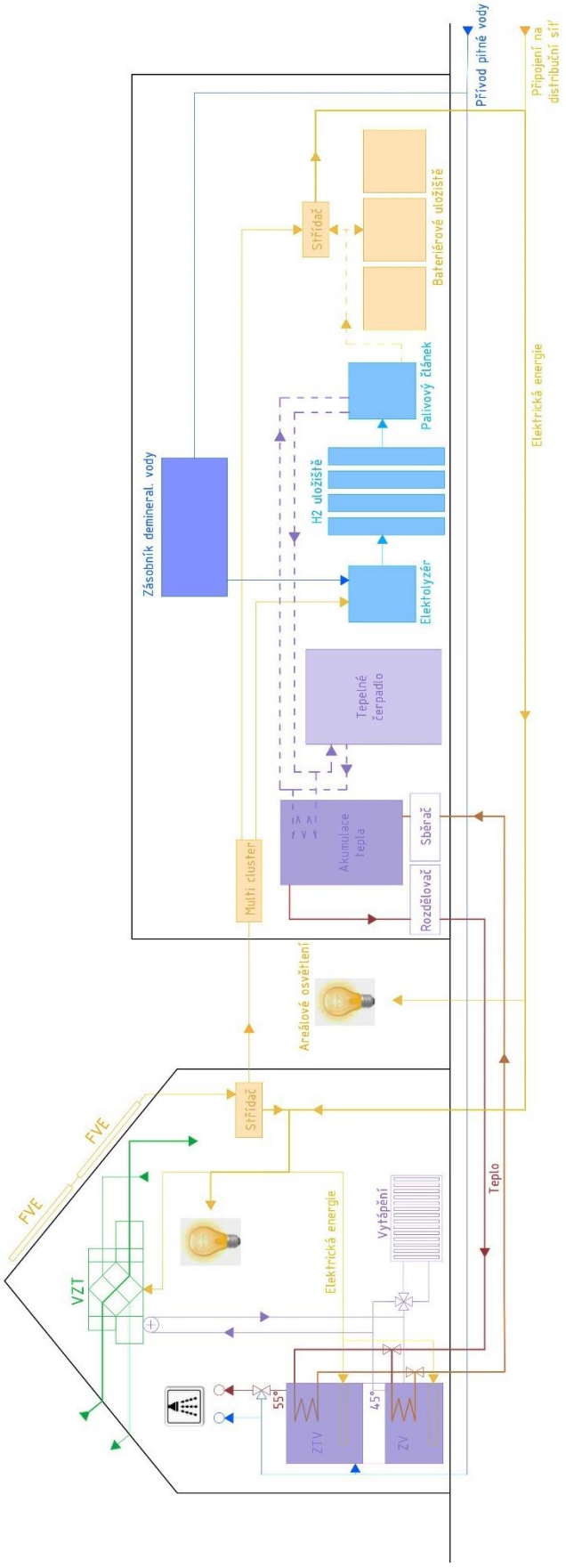
Uložený vodík bude následně spotřebováván pomocí palivového článku, který slouží ke kombinované výrobě tepla a elektrické energie. Vyrobená elektrické energie bude uložena do baterií či rovnou využita pro potřeby komplexu. Vyrobené teplo bude uloženo v centrálním zásobníku, odkud bude následně zřízen rozvod tepla do jednotlivých domů.

Varianta 1:



Obrázek 27 - Energetické schéma komplexu varianta 1

Varianta 2:



Obrázek 28 - Energetické schéma komplexu varianta 2

Projekt energetického systému s využitím vodíku

Předběžný návrh energetického hospodářství

Pro předběžný návrh jsem vytvořil výpočetní nástroj, který slouží jako pomůcka pro návrh vodíkového hospodářství. Pro vstup je potřeba znát potřeby řešeného domu a rámcovou představu, jak by mohl systém fungovat.

Obecně lze konstatovat, že systém s využitím vodíku nedosahuje vysokých účinností. Je to dáno hlavně účinností elektrolyzéru, jelikož účinnost dosahuje přibližně 50 %. V nástroji je krásně patrné, jak velký vliv má zařazení tepelného čerpadla. Nicméně hlavním pilířem výroby vodíku je akumulace přebytečné energie, která vzniká v letním období, kdy často nenacházíme využití pro tyto přebytky.

Při vytváření nástroje se vycházelo z hodnot v teoretické části, či z využití parametrů v technických listech jednotlivých výrobců. Do výpočtu je také započítaná potřebná energie pro stlačení a uložení vodíku na 350 bar. Tento tlak bude ještě předmětem návrhu systému.

Nástroj je vytvořen pro ilustraci toku energii v různých sestavách systému. Jsou z něho patrné účinnosti jednotlivých systému. V nástroji tedy zjistíme předpokládaný potřebný výkon FV elektrárny.

Následující schémata předpokládají tři možné principy fungování:

Schéma č.1: Využití vodíku pro spalování pomocí plynového kondenzačního kotle + zařazení tepelného čerpadla – ilustrační fungování systému

FVE: Potřebný výkon: 140 kWp
Přibližná plocha panelů: cca 111,65 m^2
V zimní období by bylo potřeba využít elektrickou energii z distribuční sítě.

Vodík: Roční vyrobené množství: 1390,3 kg

Spalovací kotel: Teplo: 51 920 kWh

Tepelné čerpadlo: 28 218 kWh

Potřebné množství vody: 12,4 m^3

Celková účinnost systému 85%

Schéma č. 2: Využití vodíku pro palivový článek, který vyrábí elektrickou energii a tepla, které je využíváno centrálně a ukládáno do otopné vody. Teplo je pak dodáváno do domů pomocí distribuční sítě. Elektrická energie je v případě přebytků využívána lokálně pro ohřev otopné a teplé užitkové vody.

FVE: Potřebný výkon: 320 kWp

Přibližná plocha panelů: cca 255,2 m^2

Vodík: Roční vyrobené množství: 5344,3 kg

Palivový článek: Elektrická energie: 90 853 kWh

Teplo: 90 853 kWh

Potřebné množství vody: 47,67 m^3

Celková účinnost systému 31%

Schéma č. 3: Do schématu č.2 bylo zařazeno tepelné čerpadlo. Využití vodíku pro palivový článek. Je zde patrné, jak velkou roli hraje zařazení tepelného čerpadla do systému.

FVE: Potřebný výkon: 230 kWp

Přibližná plocha panelů: cca 183,4 m^2

Vodík: Roční vyrobené množství: 3293,2 kg

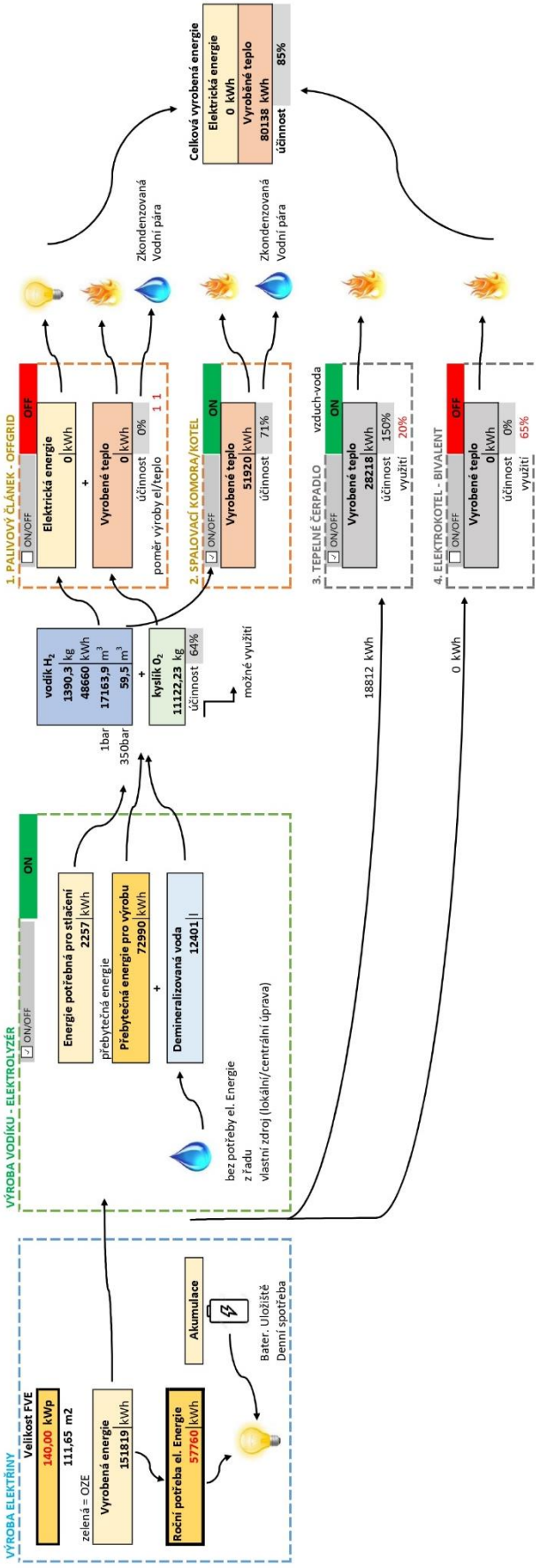
Palivový článek: Elektrická energie: 55 985 kWh

Teplo: 55 985 kWh

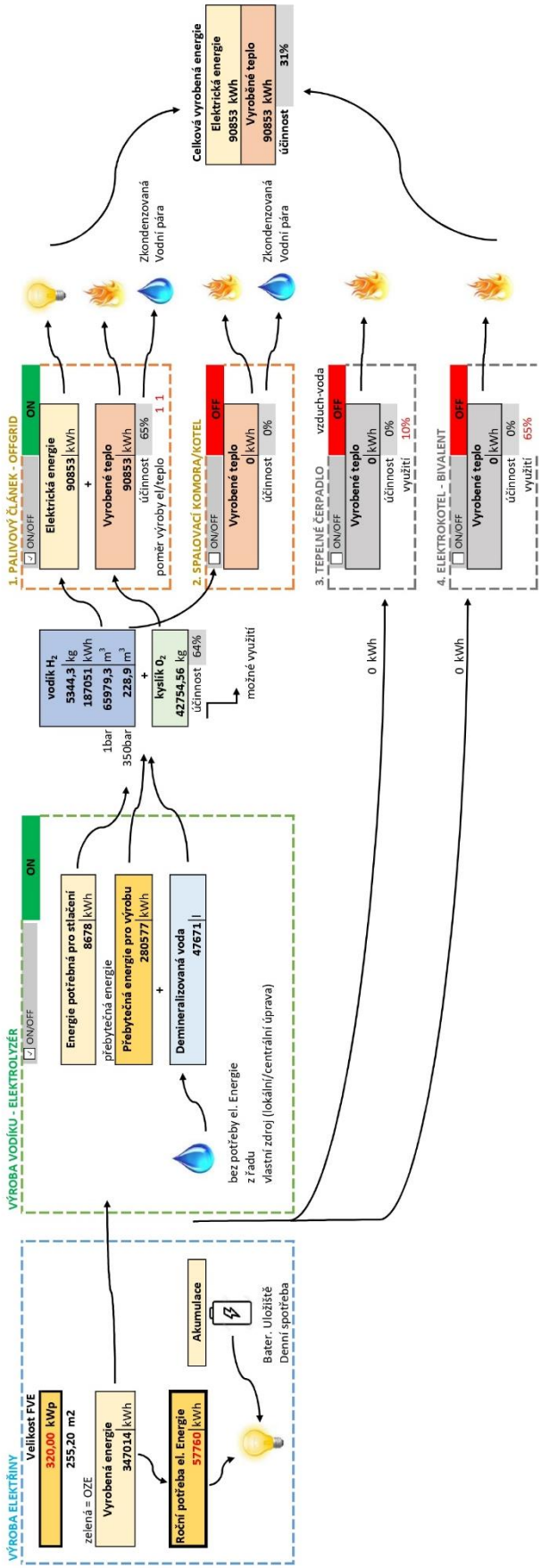
Tepelné čerpadlo: 33 540 kWh

Potřebné množství vody: 29,4 m^3

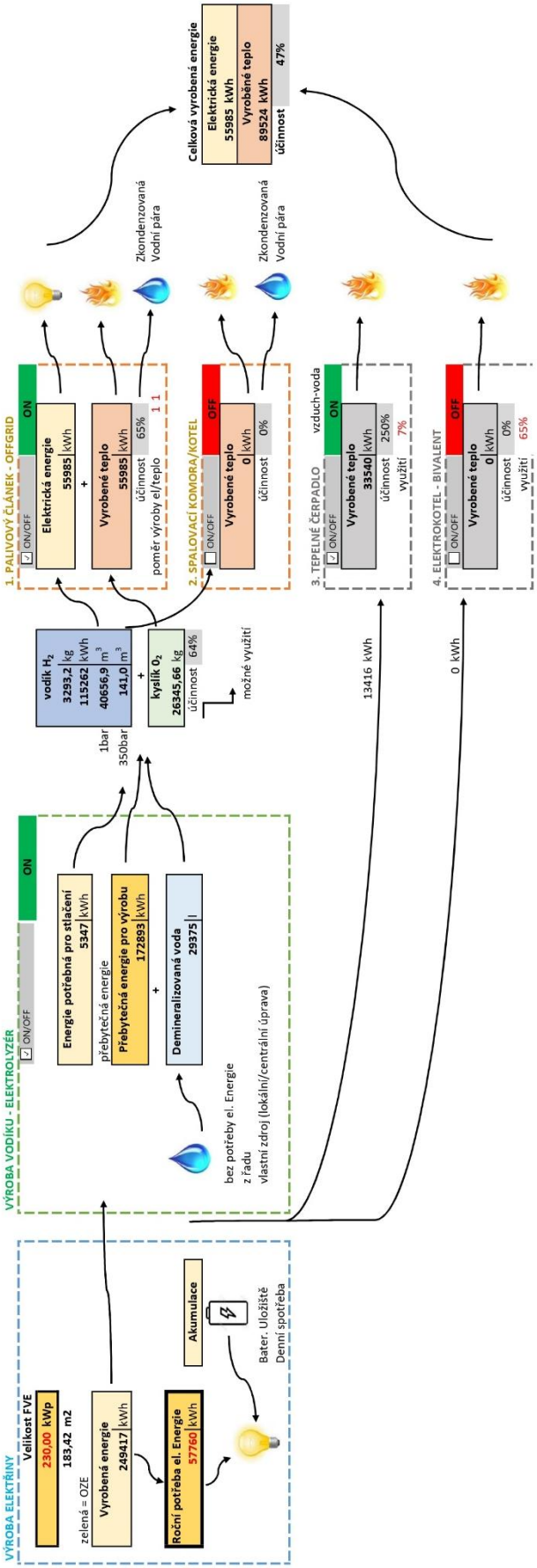
Celková účinnost systému 47%



Obrázek 29 - Výstup z výpočetního nástroje-spalování vodíku + tepelné čerpadlo



Obrázek 30 - Výstup z výpočetního nástroje-palivový článek



Obrázek 31 - Výstup z výpočetního nástroje-palivový článek + tepelné čerpadlo

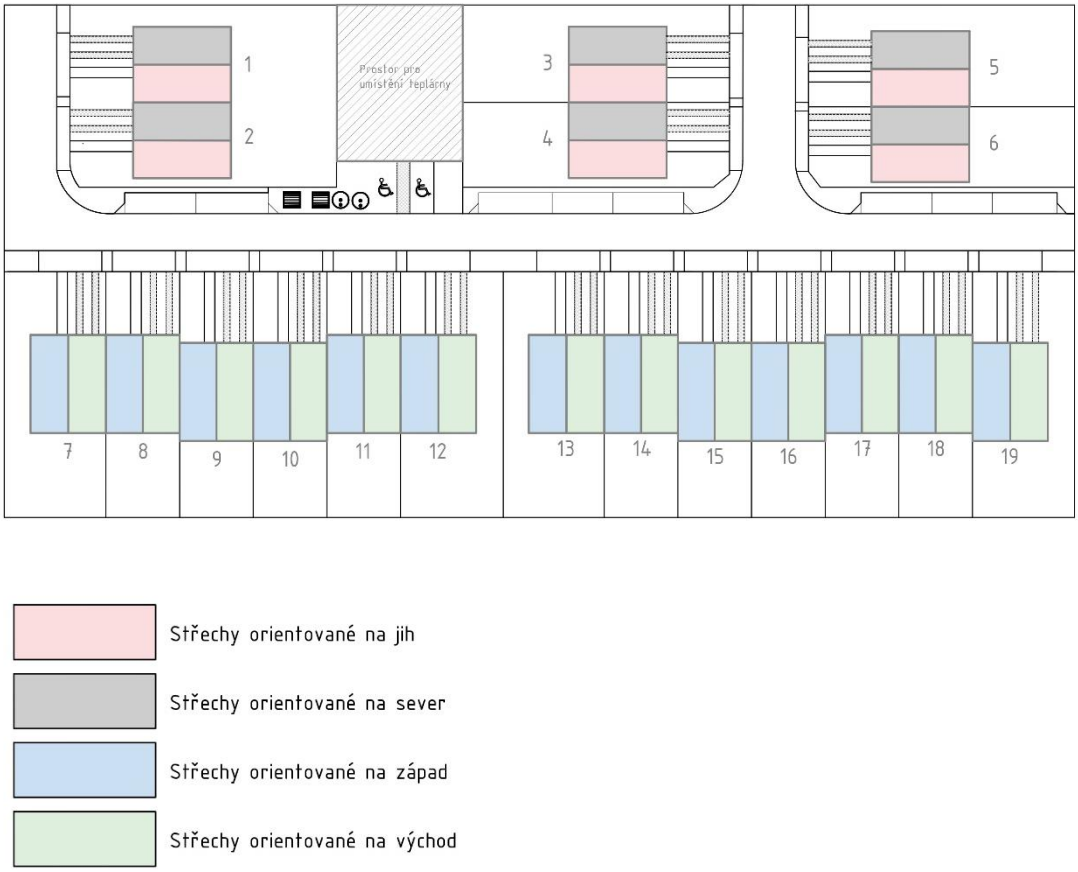
Návrh FVE (Fotovoltaické elektrárny)

Z předchozího nástroje jsem si zjistil potřebný výkon fotovoltaické elektrárny. Pro stanovení vyrobeného množství energie je nutné provést návrh fotovoltaické elektrárny. Fotovoltaické panely budou umístěny na střechách všech navrhovaných objektů.

Jako referenční fotovoltaický panel byl brán Monokrystalický panel Half-Cell 410Wp. Vlastnosti panelu:

Maximální výkon (P_{max}): 410 Wp
Otevřený okruh napětí (VOC): 50.0 V
Zkratový proud (ISC): 10.39 A
Napětí na maximální výkon (V_{mp}): 41.6 V
Proud na maximální výkon (I_{mp}): 9.86 A
Efektivita modulu (%): 20.38
Operační teplota: -40 °C to +85 °C
Maximální systémové napětí: 1000 V DC/1500 V DC
Maximální sériová pojistka: 20 A
Maximální výkon (P_{max}): 308 W
Otevřený okruh napětí (VOC): 46.1 V
Zkratový proud (ISC): 8.42 A
Napětí na maximální výkon (V_{mp}): 38.0 V
Proud na maximální výkon (I_{mp}): 8.11 A
Počet článků: 144 (6x24)
Rozměry modulů: 2008x1002x40 mm
Váha: 22 kg

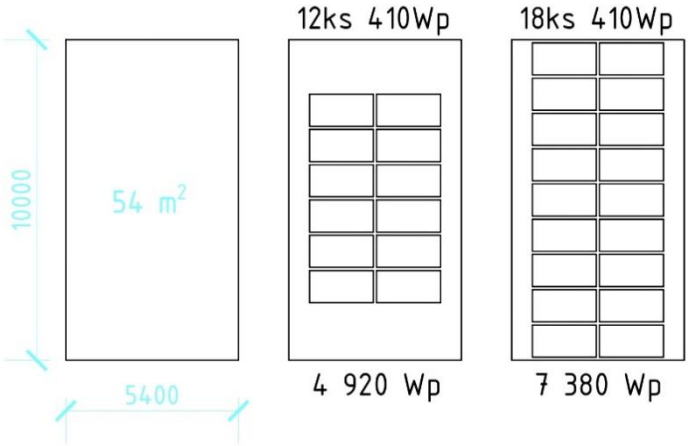
Schéma komplexu dle orientace střech:



Obrázek 32 - Schéma komplexu dle orientace střech

Orientace jednotlivých střech je patrná z výkresu č. 005, který je přílohou této práce. Rozmístění panelů na ploše střechy bylo navrženo ve dvou variantách. A to v násobcích šesti kusů z důvodu zapojení. Navržené varianty jsou s 12 ks a 18 ks.

Další umístění panelů se nabízí i na budovy centrální technické místnosti a zastřešení zásobníku vodíku. V tuto chvíli s tímto nebudu uvažovat, jelikož přesné rozměry budovy budou specifikovaný až v dalším kroku návrhu.



Obrázek 33 - Rozmístění panelů na ploše střechy

Maximální možný počet panelů umístěných na střeše je 18 kusů, tedy 36 kusů na jednom rodinném domě. To znamená pro celý komplex instalovaných 280 kWp.

Orientace	Počet	m²	Plochy střech [m²]	12 ks [kWp]	18 ks [kWp]
Jih	6	54	324	29,52	44,28
Sever	6	54	324	29,52	44,28
Západ	13	54	702	63,96	95,94
Východ	13	54	702	63,96	95,94
			2052	**187**	**280**

Tabulka 15 - Počet střech a instalovaných panelů

Pro následné posouzení byl použit nástroj PV Gis. [40] Tento nástroj slouží ke stanovení množství vyrobené elektrické energie z fotovoltaických panelů. Posouzení bylo provedeno ve výše uvedených dvou variantách.

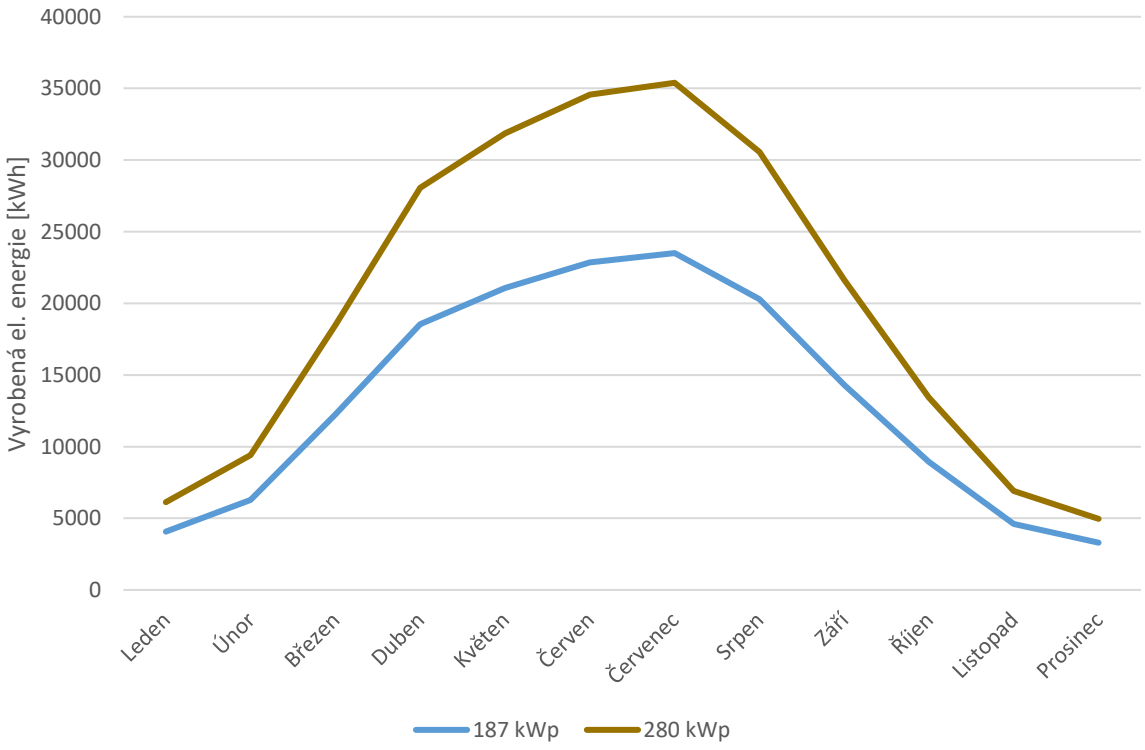
Sklon panelů: 25°

Lokace: Nový Jičín

Ztráty systému: 14%

	187 kWp [kWh]					280 kWp [kWh]				
	Jih	Sever	Východ	Západ	**Celkem**	Jih	Sever	Východ	Západ	**Celkem**
Leden	1015	369	1358	1322	**4065**	1528	554	2047	1990	**6119**
Únor	1409	550	2153	2160	**6273**	2123	825	3243	3222	**9412**
Březen	2536	1200	4241	4264	**12241**	3808	1799	6420	6457	**18484**
Duben	3519	2231	6435	6373	**18558**	5278	3352	9766	9677	**28073**
Květen	3660	2952	7234	7234	**21080**	5490	4430	10944	10987	**31851**
Červen	3856	3336	7826	7844	**22861**	5783	5025	11866	11898	**34572**
Červenec	4020	3332	8111	8045	**23508**	6030	5014	12229	12120	**35393**
Srpen	3705	2584	7031	6971	**20291**	5557	3880	10602	10520	**30559**
Září	2903	1471	4959	4964	**14297**	4357	2205	7514	7545	**21621**
Říjen	2036	690	3081	3124	**8931**	3061	1036	4621	4705	**13422**
Listopad	1141	383	1539	1549	**4613**	1723	575	2286	2316	**6900**
Prosinec	861	286	1078	1074	**3298**	1328	428	1607	1599	**4962**
Rok	**2555**	**1615**	**4587**	**4577**	**13335**	**3839**	**2427**	**6929**	**6920**	**20114**

Tabulka 16 - Měsíční výstup energie z FV systému



Graf 1 - Roční graf vyrobené energie ve variantách

Pro další posouzení bude uvažována **varianta s výkonem 280 kWp** z důvodu odhadu v předběžném návrhu v předchozím kroku výpočtu.

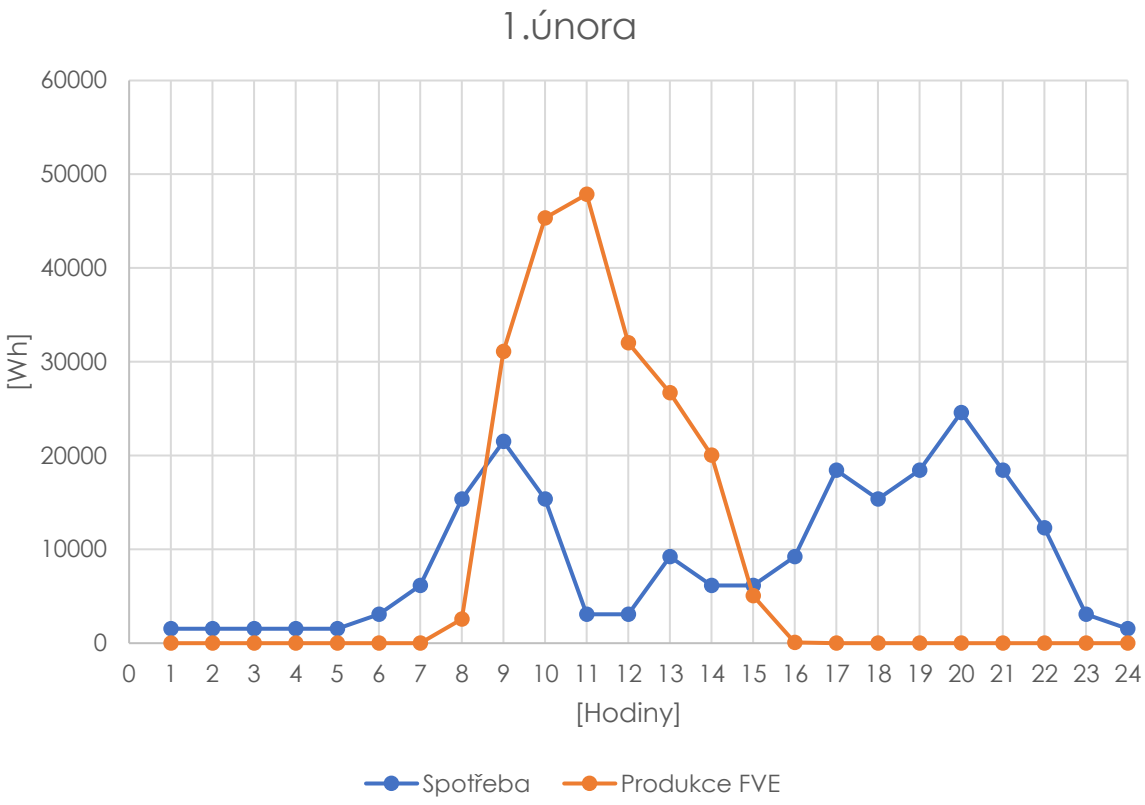
Návrh velikosti akumulace

Při návrhu bateriového uložiště bylo přistupováno ke kapacitě, která poskytne elektrickou energie pro jeden den provozu pro navrhovaný komplex. Dle mého názoru i v případě výpadku systému, tedy aby komplex nebyl bez energie v případě poruchy, která by měla být napravena do 24 hodin. I když je komplex připojen k veřejné síti.

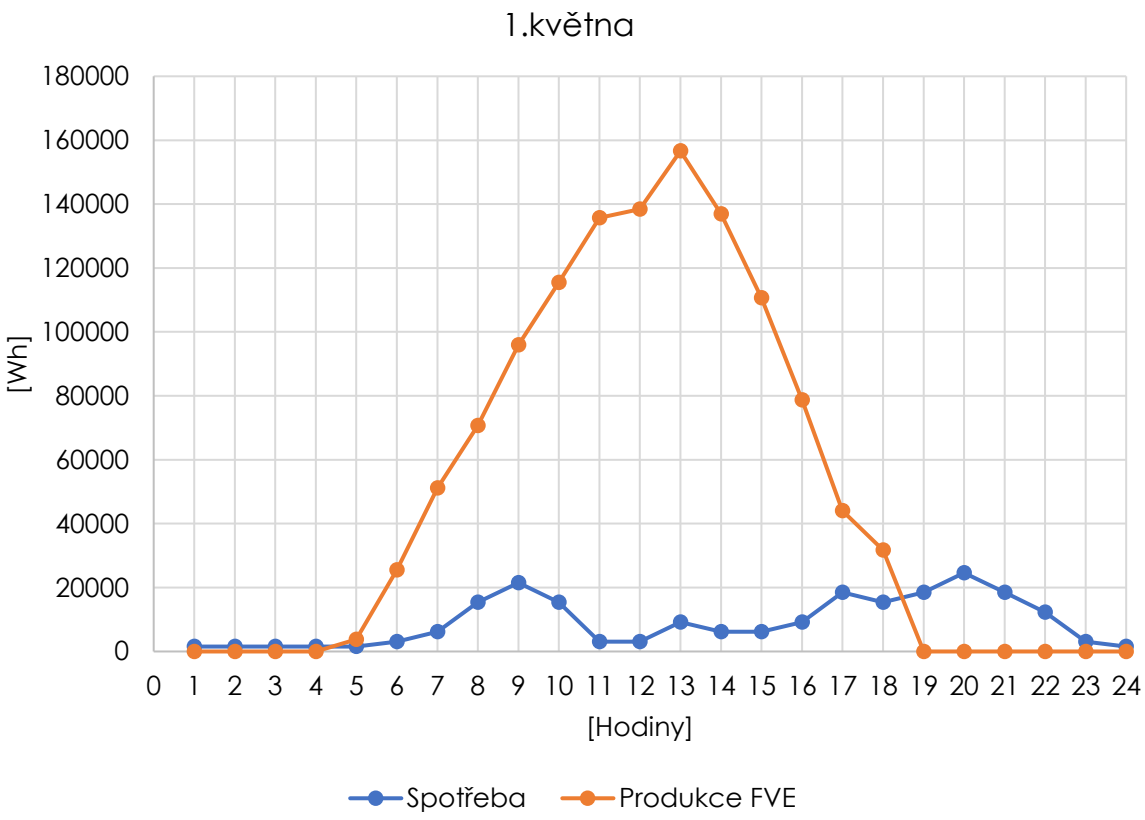
Pro další posouzení byly brány v úvahu čtyři dny v roce: 1.února, 1.května, 1.srpna a 1.listopadu dle dat z roku 2020. Profil denní spotřeby byl stanoven dle typického profilu užívání v rodinném domě.

	1.února	1.května	1.srpna	1.listopadu
0:10	0	0	0	0
1:10	0	0	0	0
2:10	0	0	0	0
3:10	0	0	0	0
4:10	0	3752	3603	0
5:10	0	25503	34830	0
6:10	0	51118	72921	381
7:10	2557	70677	104819	13779
8:10	31105	95906	134985	21669
9:10	45357	115491	158992	17702
10:10	47858	135712	171915	33698
11:10	32039	138371	175830	24088
12:10	26703	156609	169879	33975
13:10	20049	136886	154461	29578
14:10	5063	110668	130009	13255
15:10	79	78732	97665	0
16:10	0	44010	75137	0
17:10	0	31679	49403	0
18:10	0	0	2036	0
19:10	0	0	0	0
20:10	0	0	0	0
21:10	0	0	0	0
22:10	0	0	0	0
23:10	0	0	0	0
	210810	1195114	1536484	188125

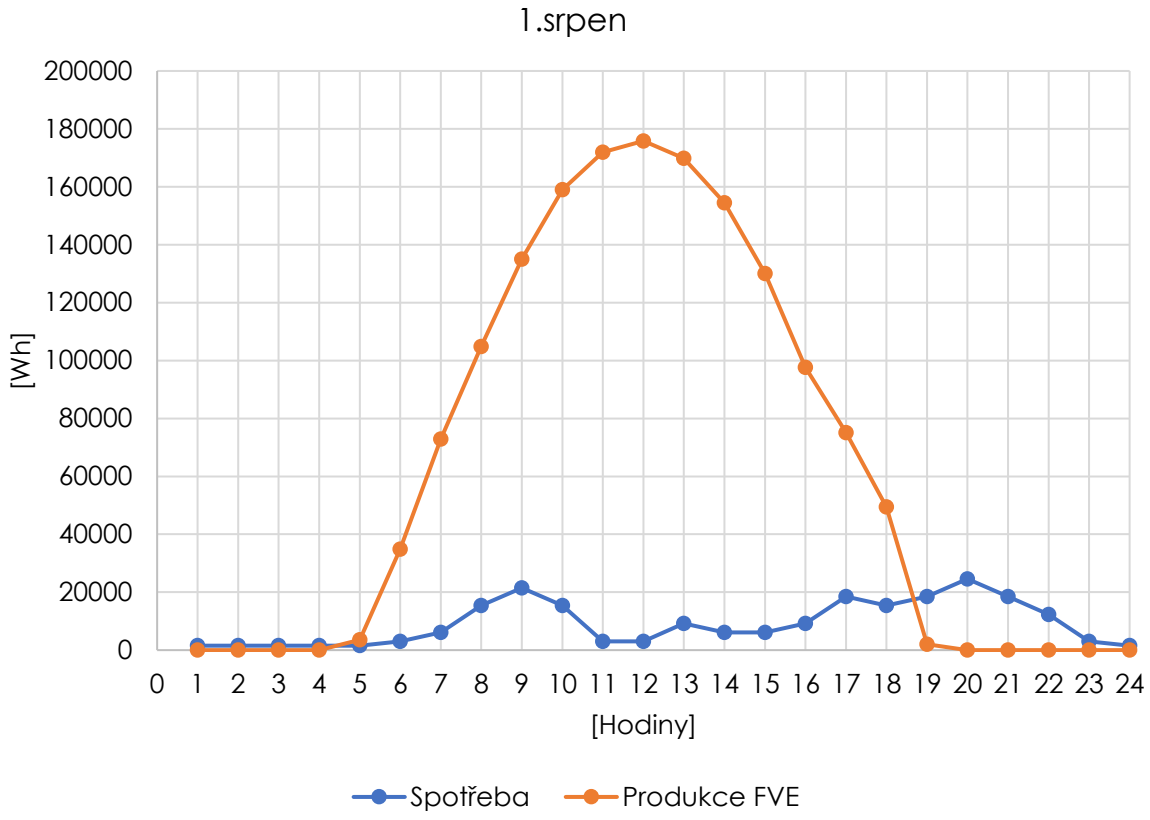
Tabulka 17 - Výroba energie ve čtyřech dnech v roce [Wh]



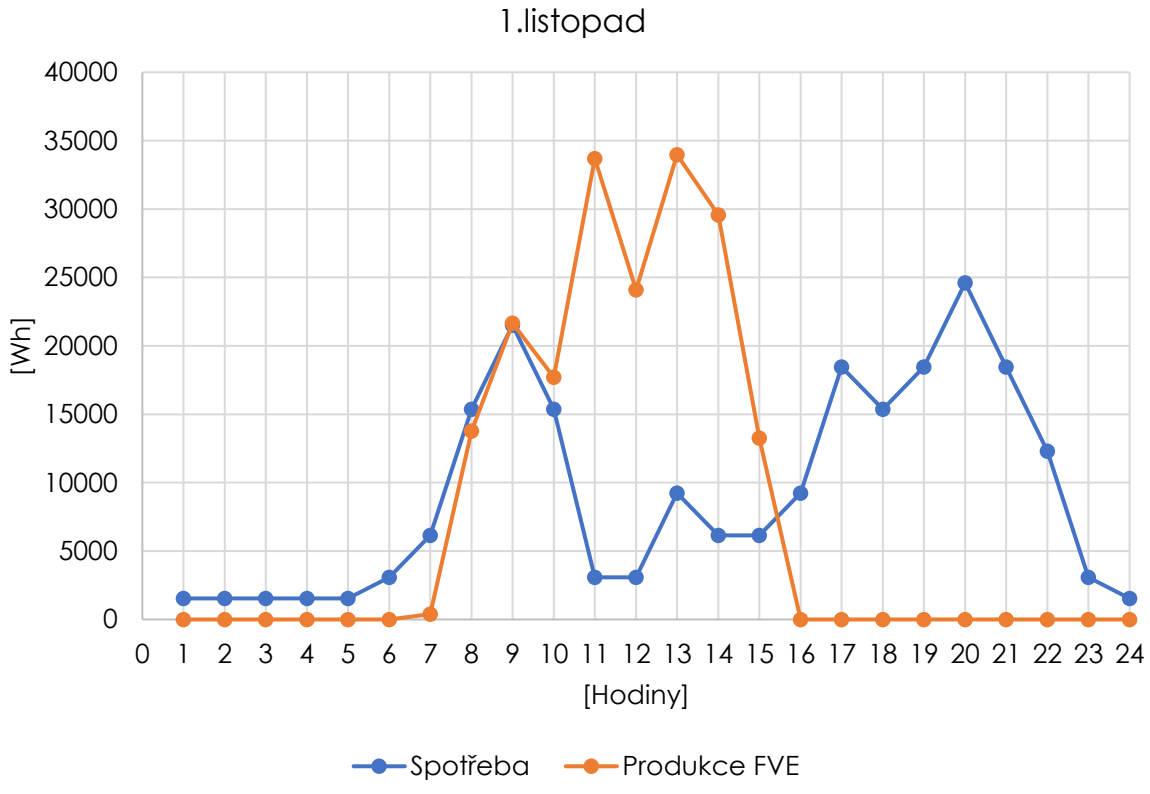
Graf 2 - Výroba a spotřeba 1.února



Graf 3 - Výroba a spotřeba 1.května



Graf 4 - Výroba a spotřeba 1.srpna



Graf 5 - Výroba a spotřeba 1.listopadu

Potřebná kapacita baterie pro fungování systému v těchto čtyřech dnech v roce dle dat z roku 2020, dle nástroje PV Gis. [40]

	1.února	1.května	1.srpna	1.listopadu
0:10	1537	1537	1537	1538
1:10	1537	1537	1537	1538
2:10	1537	1537	1537	1538
3:10	1537	1537	1537	1538
4:10	1537	0	0	1538
5:10	3075	0	0	3075
6:10	6150	0	0	5769
7:10	12818	0	0	1597
8:10	0	0	0	0
9:10	0	0	0	0
10:10	0	0	0	0
11:10	0	0	0	0
12:10	0	0	0	0
13:10	0	0	0	0
14:10	1087	0	0	0
15:10	9146	0	0	9225
16:10	18450	0	0	18451
17:10	15375	0	0	15376
18:10	18450	18450	16414	18451
19:10	24600	24600	24600	24601
20:10	18450	18450	18450	18451
21:10	12300	12300	12300	12300
22:10	3075	3075	3075	3075
23:10	1537	1537	1537	1538
	152199	84562	82526	139596

Tabulka 18 - Potřebná kapacita baterie [Wh]

Z předběžně stanovených potřeb komplexu vychází denní potřeba elektrické energie 219 kWh.

Návrh dvou kusů následujícího referenčního výrobku.

Návrh o kapacitě 227,4 kWh.

Referenční výrobek bateriového uložiště:

Rozměry (š*v*h)	1500*2320*1107.5 mm
Hmotnost	2600 kg (včetně baterií)
Pracovní teplotní rozsah	20~60 °C
Typ baterie	Li-ion (LFP)
Nominální kapacita	113. 7 kWh
Počet bateriových modelů	24 ks
Rozsah stejnosměrného napětí	696~864 V
Max. Provozní proud	148 A
Účinnost	95%

Obrázek 34 - Bateriové uložiště PylonTech [41]

Roční energetické bilance

	Typ energie	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec	Rok [MWh]	Rok %
POTŘEBY	Vytápění	19589	12331	5719	627	0	0	0	0	0	1729	11115	17708	68,82	
	Ohřev TUV	7338	6843	7338	7179	7338	7179	7338	7338	7179	7338	7179	7338	86,92	
	Teplo celkem	**26927**	**19174**	**13057**	**7806**	**7338**	**7179**	**7338**	**7338**	**7179**	**9067**	**18294**	**25046**	155,74	
	Elektrická energie	**2950**	**2950**	**2950**	**2950**	**2950**	**2950**	**2950**	**2950**	**2950**	**2950**	**2950**	**2950**	35,40	
FVE	Vyrobená energie	6119	9412	18484	28073	31851	34572	35393	30559	21621	13422	6900	4962	241,37	**61%**
	Akumulace do vody	3170	6463	13057	7806	7338	7179	7338	7338	7179	9067	3950	2013	81,90	
	Podíl elektrik. energie na teplu	**12%**	**34%**	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	**22%**	**8%**	**53%**	
	Přebytky	0	0	**1825**	**16927**	**21197**	**24084**	**24739**	**19905**	**11133**	**953**	0	0	**50%**	
VÝROBA H2	Energie pro výrobu - ztlačení 350bar	0	0	548	5078	6359	7225	7422	5971	3340	286	0	0	36,23	
	Vyrobené množství [kg]	0	0	**24,3**	**225,7**	**282,6**	**321,1**	**329,8**	**265,4**	**148,4**	**12,7**	0	0	**1610,2**	
	Vyrobené množství [m^3] 350bar	0	0	**1,0**	**9,7**	**12,1**	**13,8**	**14,1**	**11,4**	**6,4**	**0,5**	0	0	**69,0**	
	Využití uložiště [kg]	**-187,9**	**-561,8**	24,3	250,0	532,6	853,8	1183,6	1449,0	1597,5	**1610,2**	**1188,3**	**510,8**	**-561,8**	
PALIVOVÝ ČLÁNEK	Spotřeba vodíku [kg]	**698,7**	**373,9**	0	0	0	0	0	0	0	0	**421,9**	**677,4**	**2171,9**	**39%**
	Elektrická energie	11878	6356	0	0	0	0	0	0	0	0	7172	11516	36,92	
	Teplo	11878	6356	0	0	0	0	0	0	0	0	7172	11516	36,92	
	Typ provozu	**Provoz paliv. článku**		**Bez výroby elektrické energie a tepla**								**Provoz paliv. článku**			

Provoz celého systému jsem rozdělil do dvou fázi. Fáze výroby vodíků s využitím elektrické energie pro ohřev teplé vody a vytápění. Druhá fáze je provoz palivového článku, který vyrobí dostatek energie pro potřeby komplexu. Z bilancí vyplívá, že provoz palivového článku je od listopadu do února, tedy 4 měsíce v roce.

Varianta 1: V první fázi jsem zkusil roční bilanci s předpokladem ukládání vodíku o pracovním tlaku **350 bar**. Nicméně z důvodu velké spotřeby energie pro stlačení mi z výpočtu vyšel výsledek, že není dostatek přebytečné energie, aby se vyrobilo dostatečné množství vodíku. Systém by pak nedokázal vyrobil dostatek energie v zimních měsících, aby komplex nemusel čerpat energii z veřejné sítě.

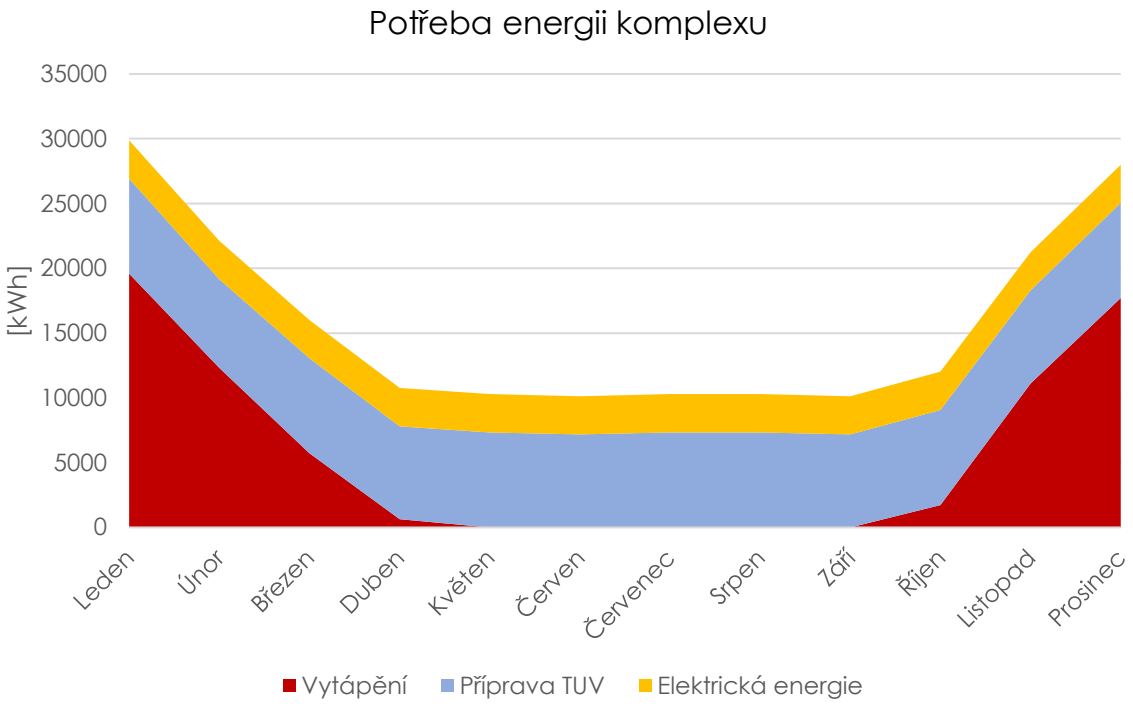
Tabulka 19 - Roční energetická bilance 350 bar

	Typ energie	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec	Rok [MWh]	Rok %
POTŘEBY	Vytápění	19589	12331	5719	627	0	0	0	0	0	1729	11115	17708	68,82	
	Ohřev TUV	7338	6843	7338	7179	7338	7179	7338	7338	7179	7338	7179	7338	86,92	
	Teplo celkem	**26927**	**19174**	**13057**	**7806**	**7338**	**7179**	**7338**	**7338**	**7179**	**9067**	**18294**	**25046**	155,74	
	Elektrická energie	**2950**	**2950**	**2950**	**2950**	**2950**	**2950**	**2950**	**2950**	**2950**	**2950**	**2950**	**2950**	35,40	
FVE	Vyrobená energie	6119	9412	18484	28073	31851	34572	35393	30559	21621	13422	6900	4962	241,37	**61%**
	Akumulace do vody	3170	6463	13057	7806	7338	7179	7338	7338	7179	9067	3950	2013	81,90	
	Podíl elektrik. energie na teplu	**12%**	**34%**	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	**22%**	**8%**	**53%**	**50%**
	Přebytky	0	0	**1825**	**16927**	**21197**	**24084**	**24739**	**19905**	**11133**	**953**	0	0	**50%**	
VÝROBA H_2	Energie pro výrobu - zlačení 65bar	0	0	100	931	1166	1325	1361	1095	612	52	0	0	6,64	
	Vyrobené množství [kg]	0	0	**32,9**	**304,7**	**381,5**	**433,5**	**445,3**	**358,3**	**200,4**	**17,1**	0	0	**2173,7**	
	Vyrobené množství [m^3] 65bar	0	0	**7,7**	**71,4**	**89,4**	**101,6**	**104,4**	**84,0**	**47,0**	**4,0**	0	0	**509,5**	
	Využití uložiště [kg]	**375,6**	**1,8**	32,9	337,5	719,1	1152,6	1597,9	1956,2	2156,6	**2173,7**	**1751,8**	**1074,4**	**1,8**	
PALIVOVÝ ČLÁNEK	Spotřeba vodíku [kg]	**698,7**	**373,9**	0	0	0	0	0	0	0	0	**421,9**	**677,4**	**2171,9**	**39%**
	Elektrická energie	11878	6356	0	0	0	0	0	0	0	0	7172	11516	36,92	
	Teplo	11878	6356	0	0	0	0	0	0	0	0	7172	11516	36,92	
	Typ provozu	**Provoz paliv. článku**			**Bez výroby elektrické energie a tepla**							**Provoz paliv. článku**			

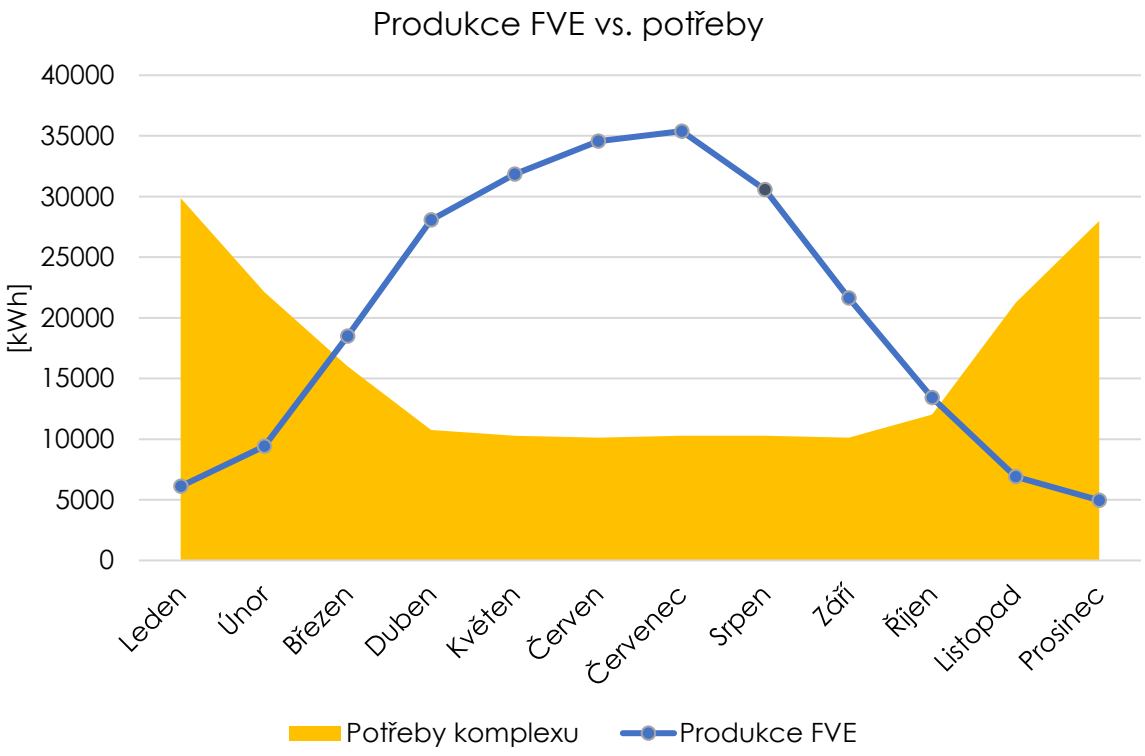
Tabulka 20 - Roční energetická bilance 65 bar

Varianta 2: Pro další výpočet jsem zjišťoval maximální možný tlak, aby bylo vyrobeno dostatek vodíku pro sezónní využití. Nejvyšší možný tlak volím hlavně z důvodů prostorových nároků na uskladnění vodíku. Vysokotlaké nádoby budou největšími komponenty celého systému.

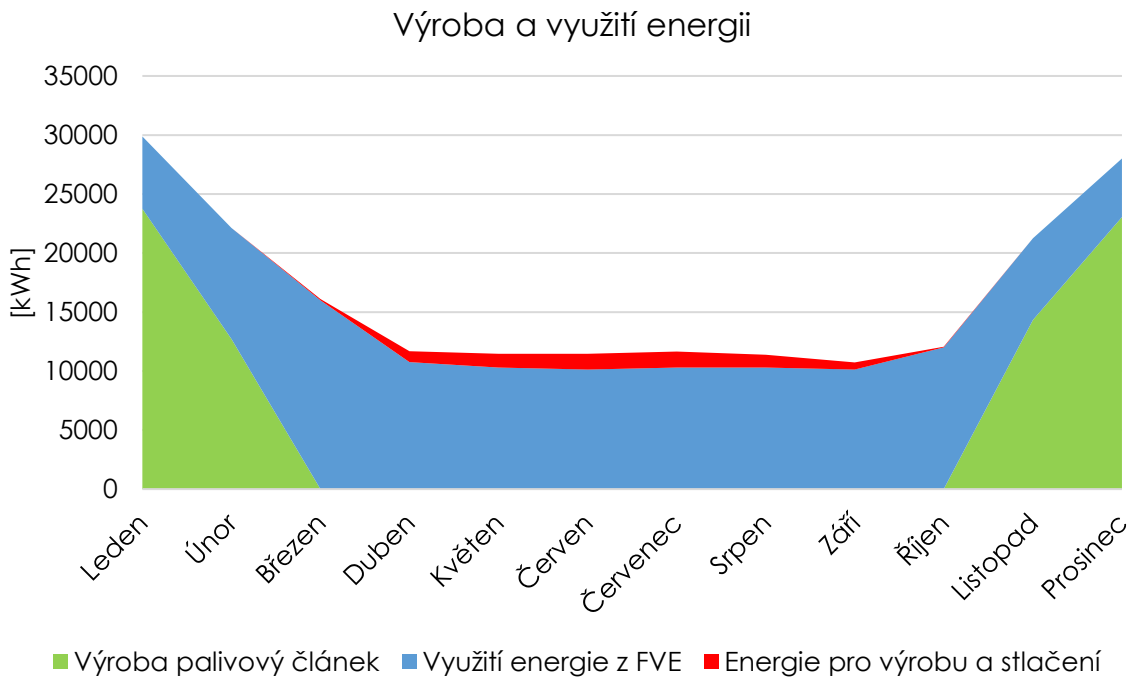
Z výpočtu jsem zvolil variantu ukládání vodíku o **pracovním tlaku 65 bar**.



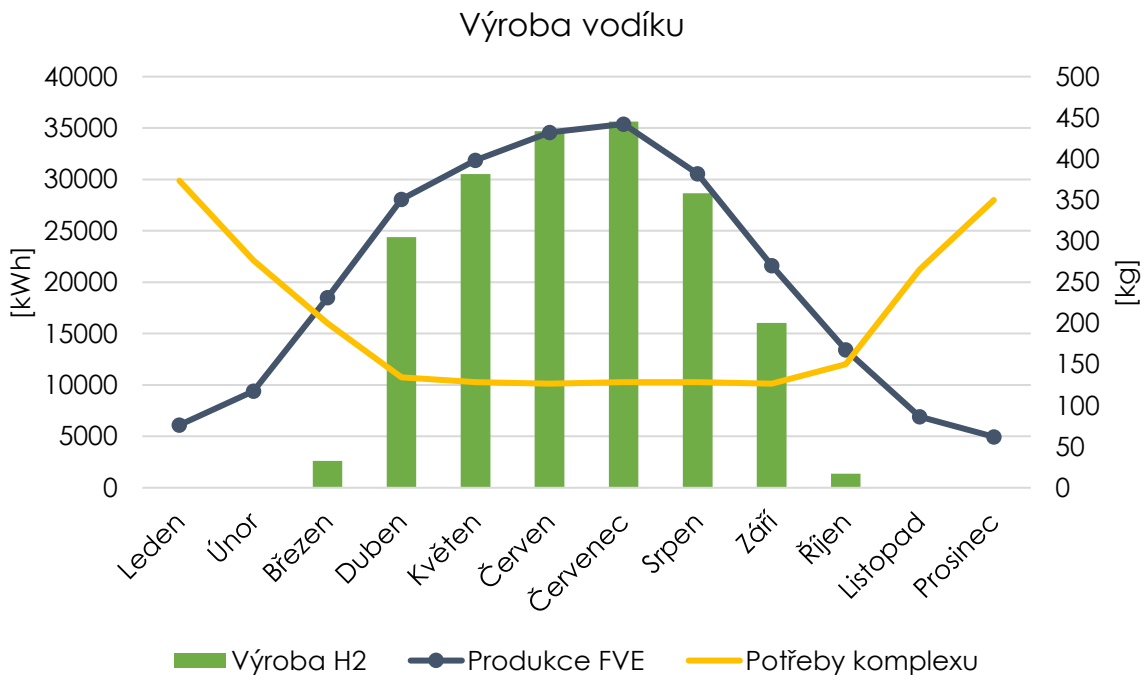
Graf 6 - Potřeba energii komplexu [kWh/měsíc]



Graf 7 - Výroba el. energie a spotřeby komplexu [kWh/měsíc]



Graf 8 - Výroba energie dle druhu spotřeby [kWh/měsíc]



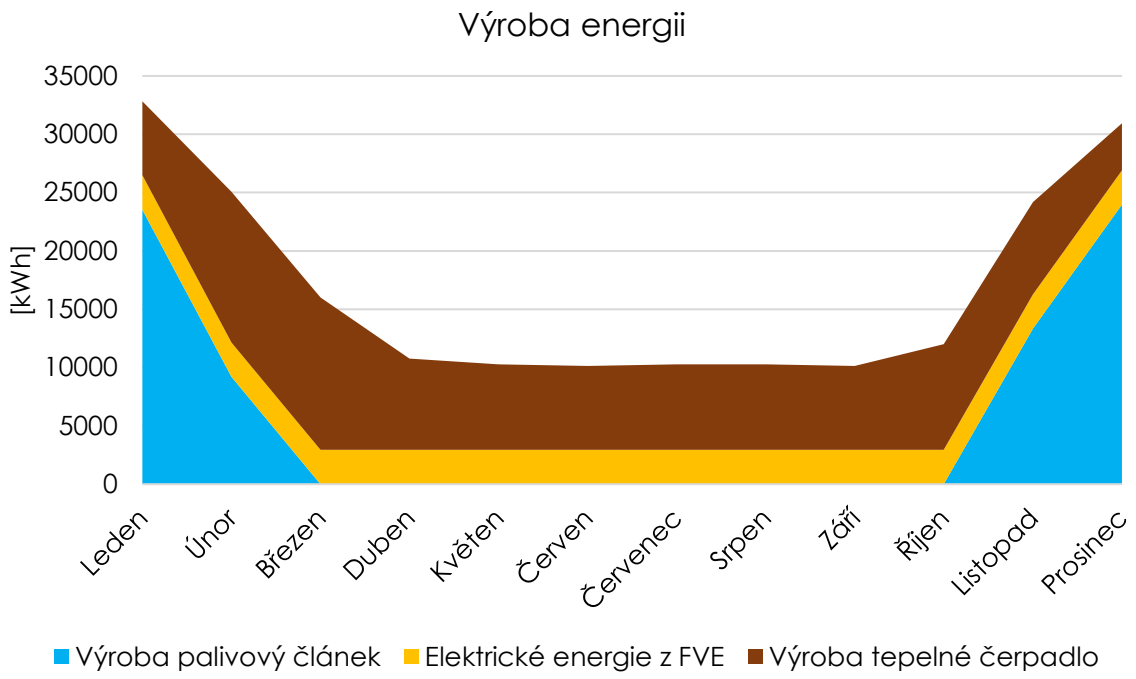
Graf 9 - Výroba vodíku v závislosti na měsících v roce

	Typ energie	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec	Rok [MWh]	Rok %
POTŘEBY	Vytápění	19589	12331	5719	627	0	0	0	0	0	1729	11115	17708	68,82	
	Ohřev TUV	7338	6843	7338	7179	7338	7179	7338	7338	7179	7338	7179	7338	86,92	
	Teplo celkem	**26927**	**19174**	**13057**	**7806**	**7338**	**7179**	**7338**	**7338**	**7179**	**9067**	**18294**	**25046**	155,74	
	Elektrická energie	**2950**	**2950**	**2950**	**2950**	**2950**	**2950**	**2950**	**2950**	**2950**	**2950**	**2950**	**2950**	35,40	
FVE	Vyrobená energie	6119	9412	18484	28073	31851	34572	35393	30559	21621	13422	6900	4962	241,37	
	Energie pro TČ	3170	6463	6528	3903	3669	3590	3669	3669	3590	4533	3950	2013	48,75	
	Přebytky	0	0	**8680**	**21025**	**25049**	**27853**	**28591**	**23757**	**14902**	**5713**	0	0	**64%**	
TČ	**Vyrobené teplo**	6339	12925	13057	7806	7338	7179	7338	7338	7179	9067	7900	4025	97	**63%**
	Podíl na výrobě tepla	**24%**	**67%**	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	**43%**	**16%**	63%	
VÝROBA H2	Energie pro výrobu - ztlačení 250bar	0	0	1823	4415	5260	5849	6004	4989	3129	1200	0	0	32,67	
	Vyrobené množství [kg]	0	0	**130,6**	**316,4**	**376,9**	**419,1**	**430,2**	**357,5**	**224,2**	**86,0**	0	0	**2341,0**	
	Vyrobené množství [m^3] 250bar	0	0	**8,0**	**19,4**	**23,1**	**25,7**	**26,4**	**21,9**	**13,8**	**5,3**	0	0	**143,7**	
	Využití uložiště [kg]	**551,2**	**280,7**	130,6	447,0	823,9	1243,0	1673,3	2030,7	2255,0	**2341,0**	**1948,5**	**1243,5**	**280,7**	
PALIVOVÝ ČLÁNEK	Spotřeba vodíku [kg]	**692,3**	**270,6**	0	0	0	0	0	0	0	0	**392,5**	**705,0**	**2060,3**	**37%**
	Elektrická energie	11769	4599	0	0	0	0	0	0	0	0	6672	11985	35,02	
	Teplo	11769	4599	0	0	0	0	0	0	0	0	6672	11985	35,02	
	Typ provozu	**Provoz paliv. článku**			**Bez výroby elektrické energie a tepla**							**Provoz paliv. článku**			

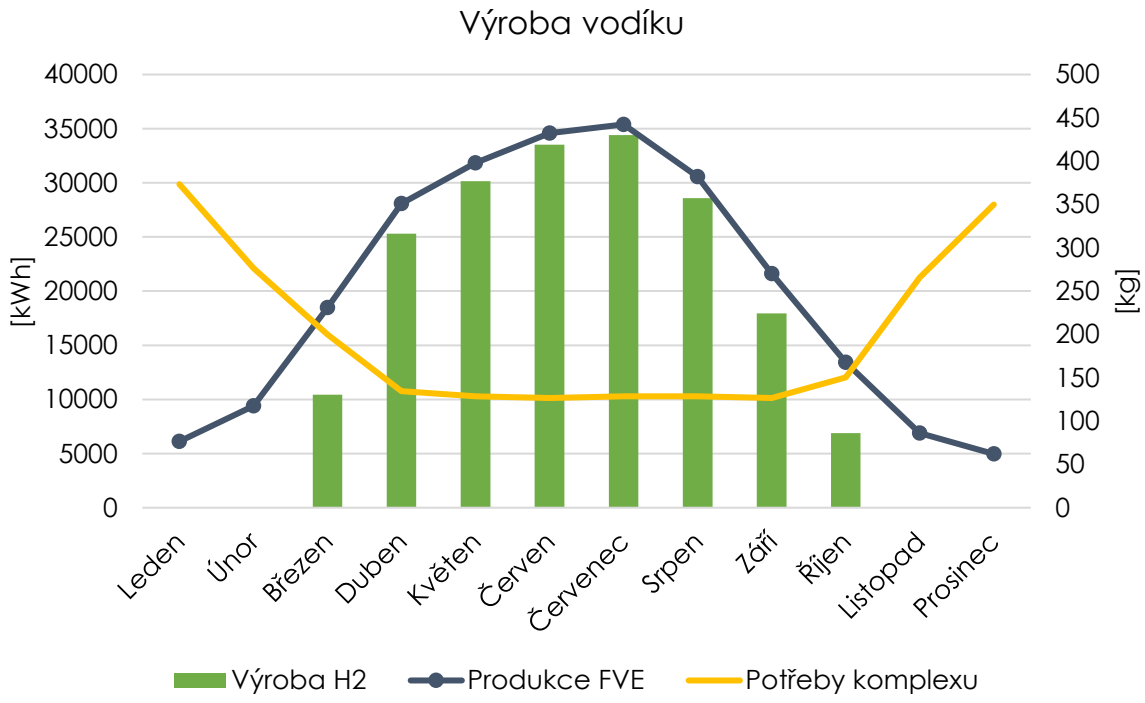
Obrázek 35 - Roční energetická bilance 250 bar + tepelné čerpadlo

Varianta 3: V této variantě jsem započítat do bilance použití tepelného čerpadla. Což výrazně snižuje potřebné množství elektrické energie pro výrobu tepla. A proto vzniká více energie pro výrobu a stlačení. Díky tomu se může vodík stlačovat na **pracovní tlak 250 bar** a dík tomu může být uložiště pro vodík výrazně menší.

Tato varianta je dle mého názoru nejvhodnější. V řešeném systému s použitím tepelného čerpadla se zvyšuje účinnost celého systému a prostorové nároky pro uložení vodíku.



Graf 10 - Výroba energie dle druhu výroby [kWh/měsíc]



Graf 11 - Výroba vodíku v závislosti na měsících v roce

Návrh vodíkového hospodářství

Výroba vodíku

Pro svůj projekt bych volil PEM elektrolyzér (Proton Exchange Membrane). Tento druh elektrolyzéru obsahuje pevný elektrolyt. Princip štěpení vody spočívá ve využití protonové výměnné membrány. Tento typ elektrolyzéru má prostorově menší nároky, než je u jiných typů elektrolyzérů.

Hlavní výhoda je jeho vysoká účinnost. PEM elektrolyzéry mají vysokou elektrochemickou účinnost, je schopen fungovat až do hranice 10 % jmenovitého výkonu. Dále jsou schopny rychle reagovat na změny výkonu, a to v řádu několika sekund či minut. Dokážou pracovat při relativně nízkých teplotách (mezi 20-80 °C), což umožňuje rychlé zahřátí a dosažení provozního stavu.

Jeho hlavní nevýhodou je pořizovací cena, jsou obecně dražší než jiné typy elektrolyzérů kvůli použití speciálních materiálů, jako je protonová výměnná membrána a katalyzátor z platiny. PEM elektrolyzéry jsou citlivé na přítomnost kontaminantů ve vodě a vyžadují čistou vodu pro optimální provoz. Pro udržení optimálního výkonu vyžadují pravidelnou údržbu, jako je čištění a výměna elektrod. Životnost těchto zařízení se pohybuje okolo 10-20 lety.

Přestože PEM elektrolyzéry mají některé nevýhody, jejich vysoká účinnost, rychlá odezva a schopnost pracovat při nízkých teplotách je činí atraktivní volbou pro vodíkové aplikace.

Pro přesné určení vhodného použití elektrolyzéru je zásadní parametr maximální přebytečný výkon z fotovoltaické elektrárny. Výrobek o požadovaném výkonu není rozhodně běžně nabízeným produktem, proto by bylo potřeba s tímto požadavek oslovit přímo konkrétního výrobce. Já pro svou práci uvažuji referenční výrobek, který byl použit v odborné práci, zabývající se podobnou tématikou. [42]

Parametry pro konkrétní typ elektrolyzéru:

Nominální výkon	200	kW
Rozsah výkonu	35-240	kW
Nominální produkce vodíku	40	m^3/h
Rozsah produkce	13-50	m^3/h
Nominální spotřeba energie	50	kWh/kg vodíku
Nominální systémová účinnost	75	%
Náběh	30	s
Provozní tlak vodíku	0-50	Bar
Spotřeba vody	70	kg/h
Rozměry	6x3x3,5	m
Váha	8	t
Provozní teplota	-15 až 35	°C

Tabulka 21 - Parametry PEM elektrolyzéru [42]

Ukládaní vodíku

Ukládaní vodíku je náročný proces, při kterém je nutné upravit vyrobené množství vodíku do stavu či skupenství, které umožní sezónní uložení pro následné využití. Pravidla pro ukládaní jsou velmi striktní hlavně z důvodu výbušných vlastností této látky. Pouze 15% koncentrace se vzduchem může způsobit požár či výbuch. [1] Skladování vodíku se navrhuje dle české normy ČSN 07 8304. Tato norma stanovuje provozní pravidla pro tlakové nádoby na plyn.

V normě jsou definovány například tyto provozní pravidla:

- Zkoušky a opravy nádob mohou provádět pouze právnické a podnikající fyzické osoby, které splňují veškeré podmínky stanovené pro tuto činnost věcně příslušnými právními a technickými předpisy.
- Vodíkové nádrže nesmí být skladovány uvnitř uzavřených budov a jich okolí musí být dobře chráněno před přímým sluncem a povětrnostními vlivy.
- V případě, že je vodíkový systém umístěn uvnitř je nutné zajistit takové větrání místnosti s intenzitou větrání min. 3x za hodinu. Budova či sklad

musí tvořit samostatný požární úsek a požární odolnost nosný konstrukcí je R60.

- Vždy je potřeba omezit aktivity okolo skladovacích láhví na nezbytně nutné.

Vodík jako takový se dá ukládat v různých druhů skupenství. Dle mého názoru v mém projektu přichází k úvahu dvě varianty:

- Zkapalněný vodík

  Proces zkapalnění vodíku je velice energeticky náročný a technicky složitý hlavně díky nízké kondenzační teplotě vodíku (-252,7 °C). Celková účinnost tohoto procesu nedosahuje vysokých hodnot.

- Uložení v plynném stavu a stlačení na požadovaný tlak

  Požadovaný tlak hraje v tomto případě velkou roli nejen z bezpečnostních, ale hlavně z objemových důvodů. Se zvyšujícím se tlakem výrazně klesá potřebné objemové nároky na uskladnění.

Tlak [Bar]	Objem [l]	Hustota [kg/m^3]	Výhřevnost [MJ/kg]	Hustota energie [MJ/l]
1	11 934	0,084	119	0,01
200	68,4	10,2	119	1,59
350	42,7	22,2	119	2,64
700	25,7	39	119	4,6
Vodík kapalný (-273°C)	-	71,08	119	8,46

Obrázek 36 - Závislost přetlaku vodíku a jeho dalších vlastnostech [43]

Stanovení velikosti úložiště pro vodík

Uložení vyrobeného množství uvažuji v plynném stavu. Zásobníky se tedy nabízí ve dvou variantách provedení. Rozdíl je hlavně v provozním tlaku uložení a objemu uložiště.

Tlakové láhve a svazky tlakových láhví

V tomto způsobu se pracuje s vysokým tlakem. Je potřeba hodně energie pro stlačení na tlak 350 barů. Pro stlačení vodíku na tento tlak se používá obvykle pístových kompresorů, přičemž energie potřebná pro stlačení na 350 barů je zhruba 30 % energie v palivu. Což celkově snižuje účinnost celého systému. V části roční energetické bilance mi vyšlo, že tento způsob není možný, jelikož komplex nevyrobí dostatek přebytků elektrické energie, aby dokázal pokrýt potřebnou energii pro výrobu a stlačení.

Referenční tlakové nádoby dokážou pojmou tlak až 500 barů. Tlaková nádoba má objem 300 litrů a prázdná váží 240 kg. Jedna láhev může pojmout až 9,5 kg vodíku. Ve svazku je 9ks lahví.

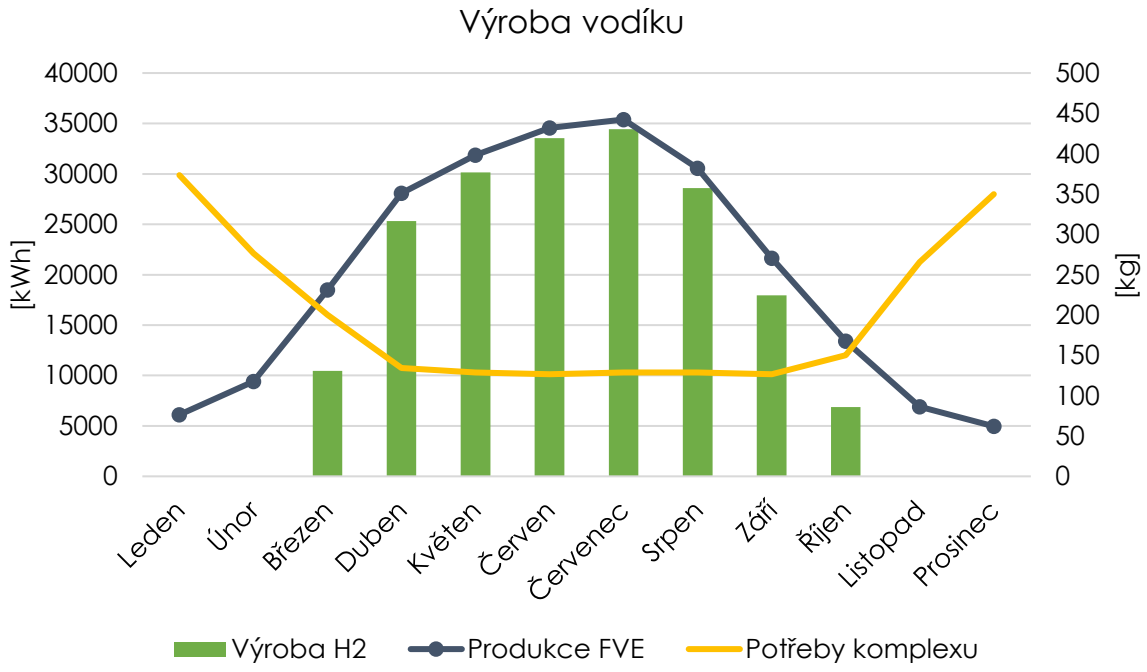
Obrázek 37 - Svazek tlakových láhví [44]

Velkokapacitní zásobníky

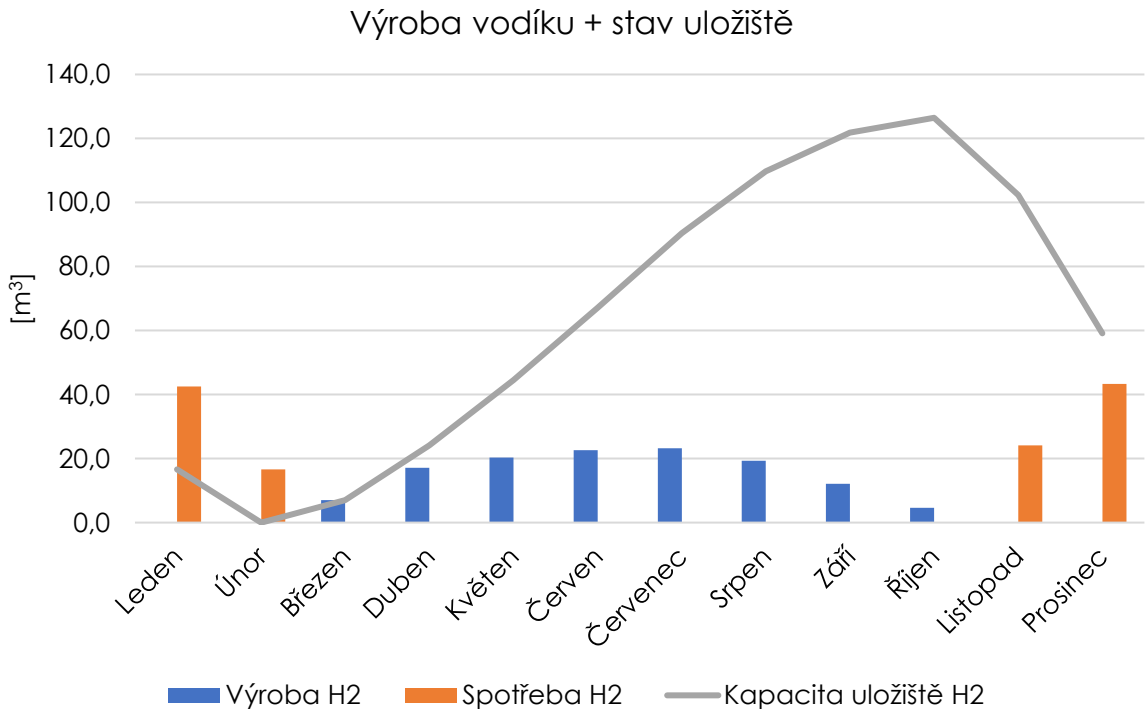
Stacionární nízkotlaké zásobníky určené pro skladování vodíku při použití této varianty nedochází ke stlačení na vysoké tlaky a tím se uspoří dost energie, která je potřebná na stlačení. Z výše zmiňovaného faktu ohledně objektu při různých tlacích, je zapotřebí větší objem. Jsou potřeba větší prostorové nároky pro instalaci. Nádoby jsou většinou vyrobeny z oceli nebo uhlíkových vláken. Provozní tlak se může pohybovat od 0-400 bar.

Obrázek 38 - Velkokapacitní zásobníky na H2 [45]

Grafy, které vychází z návrhu systému s tepelným čerpadlem o pracovním tlaku 250 bar:



Graf 12 - Výroba vodíku a stav kapacity uložiště H2 [kg]



Graf 13 - Výroba vodíku a stav kapacity uložiště H2 [m³]

K uložení je potřebné množství 2060 kg vodíku, takže přibližně 126,5 m^3. Způsob skladování ve velkokapacitních zásobnících je pro účely mého návrhu vhodný, protože pro sezónní využití jsou potřeba velké objemy. Výstupní přetlak je možné nastavit na výstupu z elektrolyzéru. Pracovní provozní tlak by byl 250 bar. Referenční výrobek jsem našel o objemu 65 m^3. Uvažuji nadzemní umístění zásobníku, umístěné pod stříškou v kompaktním tvaru centrální technickou místností. Rozměry výrobku jsou 2,7x4,0x11,2 m. Navrhuji 2 kusy zásobníků o celkové maximální kapacitě 130 m^3. [46]

Item	Material	Volume m_3	DN	Thick		Weight(kg)		Dimension
				Body	Cover	body	loading	L*W*H(mm)
Underground Storage Tank	Propane (Q345R)	10	1600	10	10	3000	3990	5260*1620*2870
		12	1800	10	10	3300	4788	5030*1820*3070
		15	1800	10	10	3860	5985	6220*1820*3070
		20	2200	12	12	5020	7980	5654*2224*3470
		25	2200	12	12	6100	9975	7004*2224*3470
		32	2400	14	14	7985	12768	7508*2428*3760
		40	2700	14	16	9720	15960	7472*2728*3973
		45	2700	14	16	10440	17955	8342*2728*3973
		50	2600	14	14	11325	19950	9908*2628*3890
		50	2700	14	16	11325	19950	9182*2728*3990
		60	2700	14	16	13035	23940	10962*2728*3990
		65	2700	14	16	13895	25935	11832*2728*3990
		80	2800	16	16	17840	31920	13512*2832*4090

Obrázek 39 -Tabulka dimenzí od výrobce

V rámci návrhu je potřeba počítat s úniky vodíku. Navrhovaný systém dokáže reálně z přebytků vyrobit 143,7 m^3 což je o 15 % více než je potřeba komplexu. Přebytečná energie se dá případně využit k jiným účelům. Přebytky jsou započítány v mém návrhu způsobem tak, že systém dokáže vyrábět větší množství vodíku než komplex sám potřebuje, tedy v případě úniku vodíku v řádu jednotek procent se bude jednat o zanedbatelné množství.

Umístění zásobníků

Největší komponent celého systému jsou velkokapacitní zásobníky. Zásobníky budou instalované jako nadzemní, nicméně jejich provedení je možné i podzemní. V rámci dalšího posouzení je potřeba stanovit prostorové uspořádaní komplexu z důvodu umístění zásobníků. Předpokládáno je zastřešení zásobníku z lehké ocelové konstrukce pro zamezení přímého slunečního záření dopadajícího na zásobníky.

Palivový článek

Pro svou práci bych volil palivový článek typu PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell). Jedná se o elektrochemické zařízení, které využívá protonovou výměnnou membránu k přeměně chemické energie vodíku na elektrickou energii.

PEMFC je charakterizován vysokou výkonovou hustotou, rychlým startem, nízkou teplotou provozu (rozsah 70-100 °C) a vynikající reakční odezvou. Tyto vlastnosti činí PEMFC vhodným pro mobilní aplikace, jako jsou automobily a palivové články pro přenosná zařízení. Celková životnost dosahuje až 40 000 provozních hodin. Elektrická účinnost se pohybuje mezi 45-60 % a tepelná účinnost se pohybuje okolo 40 %.

Přestože PEMFC nabízí mnoho výhod, je zároveň citlivý na přítomnost kontaminantů v palivu a vyžaduje čistý vodík. Kromě toho je také nutné udržovat optimální provozní teplotu a zajišťovat vhodnou hydrataci protonové výměnné membrány. Jeho největší nevýhoda je cena, obdobně jako u elektrolyzéru.

Vstupní parametr návrhu článků by měla být maximální potřeba elektrické energie v danou hodinu pro celý komplex. Nejvyšší účinnost dosahuje v rozmezí 5-30 % jmenovitého výkonu. Proto je vhodné při návrhu toto zařízení předimenzovat.

Můj návrh beru jako předběžný, pro přesný návrh by bylo vhodné dopočítat výše zmiňovaný parametr. Do návrhu volím palivový článek o výkonu 100 kW od firmy PowerCellution – Power generation system 100. [47]

Návrh distribuční sítě

Tepelnou síť v mém návrhu uvažuji provedenou jako podzemní bezkanálovou dvoutrubkovou. Provedení potrubí je předizolované, takže je vedeno v ochranné trubce s vypěněnou izolací. Potřebné krytí je 60 až 120 cm zeminy nad nejvýše položenou částí potrubí.

Nejprve je nutné si potrubí rozdělit na jednotlivé úseky. Úseky se následně navrhují na přípojný tepelný výkon Q_P. Tento parametr byl již stanoven v předchozím kroku výpočtu, viz část Stanovení přípojného výkonu.

Distribuční síť jsem rozdělil dle počtu přípojných míst, což je naznačeno ve výkrese č. 006.

Návrhový průtok – vodní sítě:

$$\dot{M}_w = \frac{k_z \cdot \dot{Q}_P}{c(t_{w1} - t_{w2})}$$ [48]

t_{w1} teplota vody na vstupu do tepelné sítě (60 °C)

t_{w2} teplota vody na výstupu ze spotřebičů (teplota ve vratném potrubí 40 °C)

c měrná tepelná kapacita vody = 4187 (J/kg.K)

k_z součinitel ztrát v síti (= 1,03)

Návrh světlosti potrubí z rovnice kontinuity

$$\dot{M} = A \cdot w \cdot \rho$$ [48]

A průřez potrubí [m^2]

w rychlost proudění [m/s] (ekonomická rychlost w = 0,5 až 2 m /s)

ρ hustota kapaliny, páry pro střední teplotní podmínky [kg/m^3]

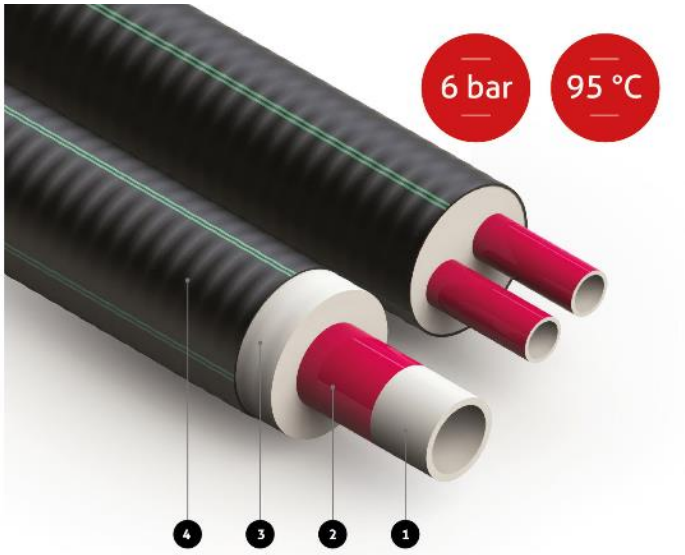
Pro kruhové potrubí je pak průřez potrubí:

$$A = \frac{\pi}{4} d^2$$

[48]

Pro návrh distribuční soustavy bych volil potrubí, které je provedeno ve dvoutrubkovém kompaktním provedení. Předizolovaného potrubí se standardní trubkou pro médium PE-Xa. Zvolené potrubí je možno také ohýbat dle předepsaného poloměru, viz tabulka níže. Výrobce v rámci svého potrubí nabízí také tvarovky pro spojovaní, odbočky a obdobné příslušenství.

Maximální zatížení je 95 °C a 10 bar. Použití izolace z polyuretanové pěny na bázi cyklopentanu poskytuje vynikající hodnotu tepelné vodivosti pouze 0,0210 W/m.K.



1 – PE-Xa médiová trubka
2 – kyslíková bariéra
3 – polyuretanová izolace
4 – LLD-PE plášť

Obrázek 40 - Schéma průřezu distribučního potrubí [49]

Tabulka s dimenzemi potrubí referenčního výrobku:

Potrubí d/di/s (mm)	Vnější plášť DA (mm)	Poloměr ohybu (m)	Ztráta U (W/m K)
double			
(2x) 25/20,4/2,3	91	0,90	0,1786
(2x) 25/20,4/2,3	111	0,90	0,1390
(2x) 32/26,2/2,9	111	0,90	0,1829
(2x) 32/26,2/2,9	126	1,00	0,1565
(2x) 40/32,6/3,7	126	1,00	0,2108
(2x) 40/32,6/3,7	142	1,10	0,1749

Obrázek 41 - Tabulka dimenzí od výrobce [49]

Ztráta potrubí U je uváděná při teplotě teplonosné látky 50°C.

Ozn. úseku	Počet domu [ks]	Přípojný výkon [kW]	Délka [m]	Návrhový průtok M_W [kg/s]	Průměr potrubí [mm]	Návrh dle tabulky d/di/s [mm]	Vnější plášť [mm]	Ztráta U [W/m .K]	Ztráta potrubí [W]
1	19	68,78	6,8	0,846	33,11	40/32,6/3,7	142	0,1749	59
2	12	43,44	6,0	0,534	26,31	32/26,2/2,9	126	0,1565	47
3	11	39,82	12,2	0,490	25,19	32/26,2/2,9	126	0,1565	95
4	10	36,2	7,1	0,445	24,02	32/26,2/2,9	126	0,1565	56
5	9	32,58	7,0	0,401	22,79	25/20,4/2,3	111	0,139	49
6	8	28,96	5,2	0,356	21,48	25/20,4/2,3	111	0,139	36
7	7	25,34	1,0	0,312	20,10	25/20,4/2,3	111	0,139	7
8	6	21,72	7,0	0,267	18,60	25/20,4/2,3	111	0,139	49
9	5	18,1	7,0	0,223	16,98	25/20,4/2,3	111	0,139	49
10	4	14,48	17,5	0,178	15,19	25/20,4/2,3	111	0,139	122
11	3	10,86	14,0	0,134	13,16	25/20,4/2,3	111	0,139	97
12	2	7,24	26,5	0,089	10,74	25/20,4/2,3	111	0,139	184
13	1	3,62	203,0	0,045	7,60	25/20,4/2,3	111	0,139	1411
		Celkem	**320,3**					**Ztráta celkem**	**2260**
									3%

Tabulka 22 - Návrhová tabulka pro distribuční síť dle úseků

Celkové ztráty potrubí vyšly 3% dle hodnot od výrobce. Nejsou v této hodně započtené ztráty místní tlakové ztráty. Tuto ztrátu jsem započítal do součinitele ztrát v síti k_z = 1,03.

Půdorysné schéma centrální budovy

Soupis všech zařízení umístěných v centrální budově:

1. Velkokapacitní zásobník na H_2 – 2x65 m^3
2. PEM elektrolyzér - 200 kW
3. Zásobník vody – 2 m^3
4. Vysokotlaký pístový kompresor – max 1000 bar
5. Palivový článek – 100 kW
6. Exteriérové tepelné čerpadla – 5x12,86 kW
7. Vnitřní jednotka tepelného čerpadla – 8,8 kW
8. Bateriové uložiště – 227 kWh
9. Akumulační nádoby – 2x3000 l

Velikost akumulační nádoby vyšla ze vztahu pro stanovení objemu akumulační nádrže empirickou hodnotou 50 litrů na každý 1 kW výkonu zdroje tepla.

110 kW x 50l = **5500l**

Pro svůj návrh volím dva kusy akumulačních zásobníků o velikost 3000 m^3 se dvěma výměníky. [50]

Tepelná čerpadla budou využita primárně pro ohřev TV, a sekundárně pro vytápění v měsících od března do října. Stanovení výkonu bude předpokládáno dle stanovených potřebných výkonů pro celý komplex.

Q_{TV}=55 kW

Q_{VYT}=55 kW

$Q_{TČ}= Q_{TV}+ Q_{VYT}/4 = 55 + 55/4 =$ **68,75 kW**

Pro návrh jsem volil produkty od firmy Stiebel Eltron. [51]

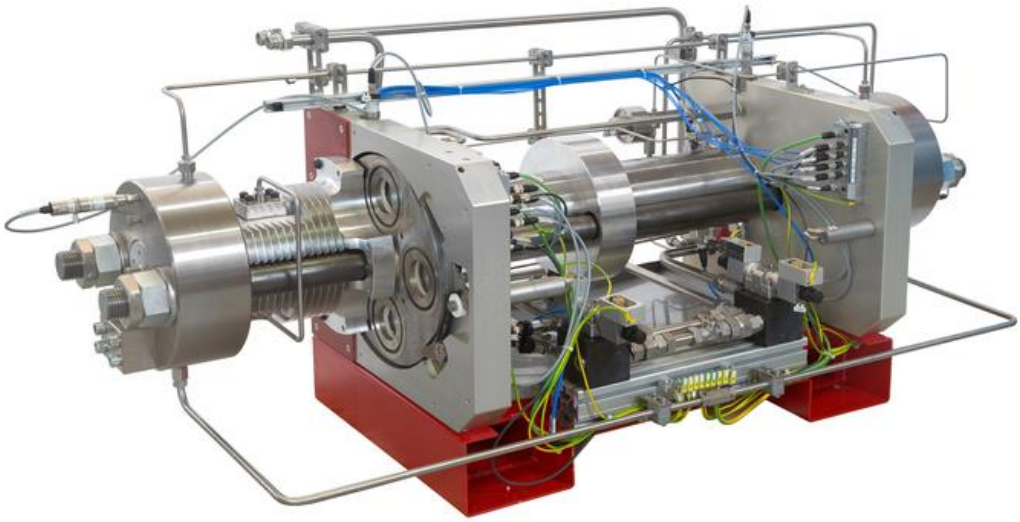
Navrhuji kaskádu tepelných čerpadel s počtem 5 ks. Jedna jednotka tepelného čerpadla o výkonu 12,86 kW. Celkový maximální výkon 64,3 kW.

Vnitřní jednotka pro tepelné čerpadla obsahuje dodatkový/nouzový zdroj o příkonu 8,8 kW. Hydraulický modul usnadňuje napojení tepelných čerpadel vzduch-voda do hydrauliky topné soustavy. Integrovaná zařízení jsou regulátor tepelného čerpadla, vysoce účinné oběhové čerpadlo vytápění pro vytápění a teplou vodu, pojistný ventil, expanzní nádoba a nouzové přídavné vytápění.

Jednotky tepelných čerpadel jsou uvažovány jako závěsná na stěnu centrální budovy s orientací mimo zástavbu rodinných domů. Provedení za pomocí systémových konzolí, které nabízí výrobce. Pozice a výškové umístění by bylo potřeba před realizací ověřit akustickým posudkem.

Obrázek 42 - Možné zavěšení jednotky tepelného čerpadla [52]

Pro stlačení vyrobeného vodíku, je potřeba vysokotlaký pístový kompresor, který upraví vyrobený plyn na požadovaný tlak. Zařízení komprimuje vodík z 24 barů na maximálně 1 000 barů. Přístroj pracuje jako suchý kompresorový systém, takže v případě úniku není možné kontaminovat uložený vodík ani životní prostředí.



Obrázek 43 - Vysokotlaký pístový kompresor [53]

Technické listy zmiňovaných komponentů navrhovaného systému jsou přílohou této práce.

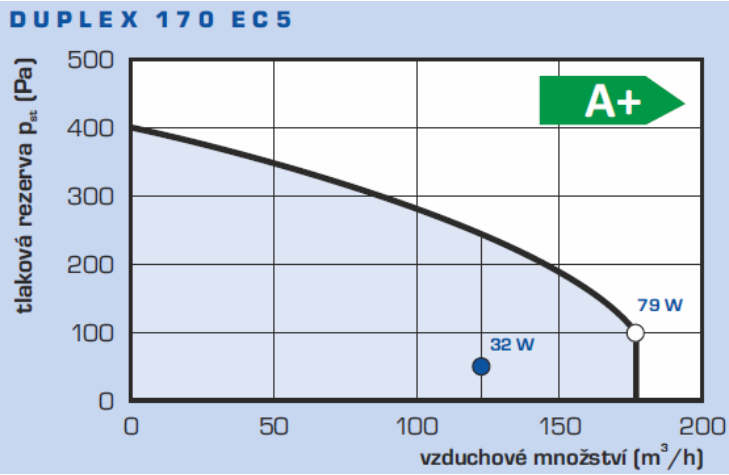
V půdorysu teplárny jsou zakresleny jednotlivé komponenty v reálném měřítku, a jejich pozice je spíše ilustrační. V zakresleném schématu výkresu č. 007 a 008 vyplívá, že centrální budova o rozměrech 12x10 m by měla být prostorově dostačující pro daný systém. Velkokapacitní zásobníky na vodík bych volil v nadzemním provedení. Nad zásobníky by měla být vybudována stříška, které by v kontextu celé výstavby vytvořila kompaktnější tvar. Na hranici s pozemky jednotlivých rodinných domů by byla vyzděná opěrná stěna, která by měla oddělující a bezpečnostní funkci. V řešeném schématu je zaznačen prostor možného rozšíření kapacity uložiště vodíku. Za předpokladu, že by bylo potřeba navyšovat kapacitu z důvodu růstu zástavby, předpokládaný růst výstavby je směrem na sever.

Půdorysné schéma 1.NP rodinného domu

V rámci návrhu bude v každém rodinném domě umístěna akumulační nádrž s výměníkem, v kterém bude pomocí výměníku předáno teplo z navrhované distribuční sítě. Umístění těchto prvků je naznačeno ve výkrese č.009. Řešení je pouze schématické, pro další návrh by bylo potřeba vypracovat projektovou dokumentaci v náležité podrobnosti a stupni, včetně návrhu regulace, velikosti armatur apod.

Akumulační nádrž s výměníkem TV 6 m2 s dělicím plechem. Rozměry prvku jsou o průměru 550 mm a výšky 1905 mm. Uvažovaná nástěnná instalace. Velikost zásobníku byla odhadnuta dle empirických výpočtu a produktové řady vybraného výrobce o celkovém objemu nádrže 398 l. [54]

Ve výpočtech jsem uvažoval s nuceným větráním objektů pomocí rovnotlaké větrací jednotky. Je uvažováno s podstropní instalací v technické místností domu. Navrhovaný průtok vzduchu je 130 m^3/h, dle intenzity větráni v části ztráty domu větráním.



Obrázek 44 - Výkonové parametry [55]

Ekonomická a technická proveditelnost

Dostupnost některých komponentů je problematičtější, jelikož se jedná o relativně nové technologie. Jedná se zejména o komponenty, které mají specifické vlastnosti a jejich výroba je proto zakázková dle požadavků konkrétní instalace. Zájem o tyto prvky zatím není tak velký, aby se mohla zrealizovat sériová výroba alespoň v některých případech. Konkrétně jsem měl potíže s dohledáním velkokapacitních zásobníků, které mají pracovní tlak až okolo 300 bar. Dále instalace elektrolyzérů o vyšších výkonech je spíše ojedinělá. Dle strategie Evropské unie je plán do roku 2025 zvýšení stávající výroby elektrolyzérů čítající 1,75 GW ročně na 17,5 GW. Tento cíl si vyžádá výrazný nárůst výroby samotných elektrolyzérů, a to až na 25 GW za rok. Celkový výkon elektrolyzérů v EU by na konci desetiletí měl dosahovat mezi 90–100 GW. [56] Tento fakt by mohl přispět k lepší dostupnosti a nižší ceně těchto zařízení.

Použití vodíku v systémech budov klade zvláštní požadavky na těsnost zařízení a vodík může způsobit křehkost oceli. Proto je nutné, aby ventily, tlaková vedení a další pomocná zařízení splňovali speciální požadavky a jejich výroba vyžaduje přesné technologické postupy. Součástí vodíkových zařízení jsou i ostatní komponenty jako jsou různá čerpadla, výměníky, čističky vody a vzduchu, které dávají velký potenciál rozvoje a inovace pro výrobce těchto zařízení.

Ceny jednotlivých komponentů a celého systému vodíkového hospodářství jsou v současné době stále poměrně vysoké, což může být překážkou pro jeho širší využití. Výroba vodíku pomocí elektrolýzy z obnovitelných zdrojů energie je stále nákladná, přestože se náklady snižují v důsledku rostoucího zájmu o tuto technologii.

Náklady na palivové články se také snižují, ale stále jsou výrazně vyšší. Navíc kromě vysokých nákladů na palivové články a elektrolýzu je nutné počítat s náklady na distribuční síť pro vodík, která bude muset být vybudována, pokud by se vodík spotřebovával až na úrovni odběrného místa. Celkové

náklady na vodíkové hospodářství jsou tak zatím vyšší než u jiných zdrojů energie. Nicméně vzhledem k rostoucímu zájmu o udržitelné a bezemisní zdroje energie se očekává, že náklady na vodíkové hospodářství se budou dále snižovat s rozvojem technologií a s narůstající poptávkou.

Investiční náklady pro standartní řešení:

Každý dům má své tepelné čerpadlo a fotovoltaickou elektrárnu o výkonu 9,8 kWp s bateriovým uložištěm o kapacitě 6,55 kWp.

Položka	Referenční výrobek	Cena za položku	Práce/instalace	Celkem vč. DPH
Fotovoltaické panely - 187 kWp	MAS-6M-HC I 410 W	1 267 200 Kč	380 000 Kč	1 647 200 Kč
Bateriové uložiště pro každé RD	Goodwe F 6.6-H 6,55 kWh	3 041 900 Kč	380 000 Kč	3 421 900 Kč
Tepelné čerpadla pro každé RD	Nibe vzduch voda AMS 10-6	2 280 000 Kč	760 000 Kč	3 040 000 Kč
			Celkem	**8 109 100 Kč**
			pro jeden RD	426 795 Kč

Tabulka 23 - Investiční náklady pro standartní řešení

Provozní náklady pro časté řešení:

V této variantě se nejedná o soběstačný systém, proto je nutné odebírat elektrickou energii ze sítě. Jako provozní náklady této varianty počítám hlavně poplatky za elektrickou energie odebranou ze sítě, ostatní poplatky budou téměř totožné s provedením s vodíkovým hospodářstvím. Ve výpočtu bylo předpokládáno s cenou 8,5 Kč/kWh a fixní složky plateb vypočtena procentuální podílem 40 % dle aktuální ceníku a standartních sazeb distributorů.

Položka	Roční potřeba energie ze sítě [MWh/rok]	Variabilní složka [Kč/rok]	Fixní platby [Kč/rok]	Celkem [Kč/rok]
Elektrická energie ze sítě	37,31	317 143 Kč	126 857 Kč	**444 001 Kč**
pro jeden RD	1,96	16 692 Kč	6 677 Kč	23 368 Kč

Tabulka 24 – Předpokládané poplatky za elektrickou energii distributorovi

Investiční náklady navrhované řešení:

Do výpočtu nebyly započítané investiční náklady na zařízení, která budou instalována v obou posuzovaných variantách. Konkrétně se jedná například o vzduchotechnický systém domu, střídač, podlahové vytápění, akumulační zásobník instalovaný v každém RD, a další náklady na armatury, regulace apod. Také jsem do investičních nákladů nezapočítal systém řešení splaškové a dešťové kanalizace, který předpokládám, že bude v obou posuzovaných variantách stejný.

Položka	**Referenční výrobek**	**Cena za položku**	**Práce/instalace**	**Celkem vč. DPH**
Stavba technické budovy	---	1 000 000 Kč	500 000 Kč	1 500 000 Kč
Distribuční síť - teplo	NRG HeatFlex - 320 m2	696 000 Kč	696 000 Kč	1 392 000 Kč
Velkokapacitní zásobník na H2	CLW - 2x65 m3	960 000 Kč	100 000 Kč	1 060 000 Kč
PEM elektrolyzér	200 kW	3 888 000 Kč	200 000 Kč	4 088 000 Kč
Zásobník vody – 2 m3	Česká nádrž 2,0 m3 samonosná	16 444 Kč	---	16 444 Kč
Vysokotlaký pístový kompresor	---	925 000 Kč	100 000 Kč	1 025 000 Kč
Palivový článek – 100 kW	Power generation system 100	1 512 000 Kč	100 000 Kč	1 612 000 Kč
Systém tepelných čerpadel	STIEBEL HPA-O 13 C Premium	1 736 350 Kč	100 000 Kč	1 836 350 Kč
Akumulační nádoby – 2x3000 l	Regulus PSWF 1500 N+	134 794 Kč	50 000 Kč	184 794 Kč
Bateriové uložiště – 227 kWh	PylonTECH Optim US-B1-100	1 848 000 Kč	100 000 Kč	1 948 000 Kč
Fotovoltaické panely - 280 kWp	MAS-6M-HC I 380W-410W	3 009 600 Kč	1 140 000 Kč	4 149 600 Kč
			Celkem	**18 812 188 Kč**
			pro jeden RD	990 115 Kč

Tabulka 25 - Investiční náklady navrhované řešení

Z výše uvedených tabulek je evidentní, že provedení systému s vodíkovým hospodářstvím je výrazně dražší než standartní/běžné provedení. Otázkou je, jak velký podíl tvoří cena komponentů, které jsou v současnosti dražší z důvodu malého počtu výrobku na trhu.

Rozdíl investiční nákladů pro jeden rodinný dům či domácnost je **563 320 Kč**.

Prostá doba návratnosti tohoto systému se započítáním nutných poplatků za spotřebu elektrické energie ze sítě, pak vychází okolo **24 let**.

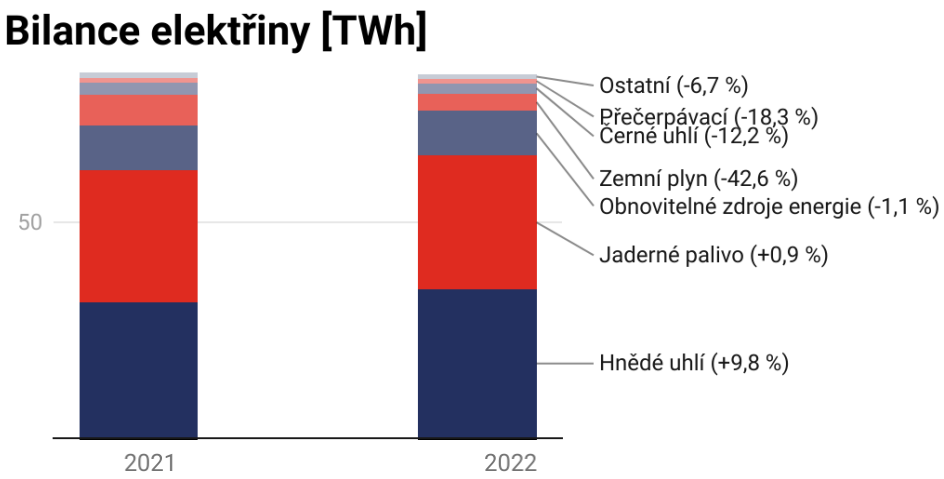
Pro stanovení NPV či čisté současné hodnoty by bylo potřeba stanovit provozní náklady pro údržbu a servis systému. A dále potřebné náklady na výměnu potřebných částí jednotlivých komponentů, což je velmi složité odhadovat, jelikož data k těmto cenám nejsou běžně dohledatelná a dostupná. Z tohoto důvodu jsem neposuzoval výše zmíněné ekonomické ukazatele.

V případě porovnání s ostatními ostrovními systémy budov bez použití vodíkového hospodářství mohou být levnější na pořízení. V dlouhodobém horizontu jsou často dražší na údržbu a spotřebu paliva, zejména pokud jsou využívány diesel generátory. Na druhou stranu ostrovní systémy s vodíkovým hospodářstvím jsou obvykle dražší na pořízení, ale mohou být levnější na provoz a údržbu v dlouhodobém horizontu, zejména pokud jsou využívány obnovitelné zdroje energie a vodík je vyráběn za pomoci slunečního, případně větrného zdroje energie.

Ekologicky přínos systému

Zásadní roli v porovnání ekologického přínosu celého systému je původ, respektive způsob výroby elektrické energie, která je využívána k výrobě vodíku pomocí elektrolyzéru. V případě mého projektu se počítá s výrobou energie ze solárních panelů, tedy z obnovitelného zdroje energie. Kdyby se odebírala elektrická energie ze sítě, rozhoduje o ekologické stránce daného řešení energetický mix daného státu.

V současné době je energetický mix elektrické energie v ČR tvořen především fosilními palivy, a to zejména uhlím a plynem. Podle dat z roku 2022 tvořilo uhlí 36,9 % výroby elektrické energie a plyn 4,0 %, zatímco obnovitelné zdroje energie jako vodní elektrárny, větrné a sluneční elektrárny přispěly celkem 10,4 %. Zbytek elektrické energie se vyráběl v jaderných elektrárnách. [57]



Obrázek 45 - Změny energetický mix rok 2021 a 2022 [57]

V posledních letech se však v ČR výrazně rozvíjí využití obnovitelných zdrojů energie, zejména větrných a slunečních elektráren. Ty se stávají stále konkurence schopnějšími a výroba elektřiny z těchto zdrojů se stále více rozšiřuje. V současnosti probíhá v ČR intenzivní diskuse o budoucnosti energetického mixu a snaze o přechod k udržitelnějším zdrojům energie s nižšími emisemi skleníkových plynů. Jedním z klíčových témat je využití vodíku a jeho výroba z obnovitelných zdrojů energie, která by mohla hrát významnou roli v budoucím energetickém mixu v ČR.

Když bych tento systém porovnal s jinými ostrovními systémy, tak by byl hlavní rozdíl to, že tyto systémy nedokážou akumulovat vyrobenou energii pro zimní období. V zimních měsících je potřeba zařadit do provozu další zařízení, která dokážou vyrábět potřebnou energii, většinou tu elektrickou. K těmto účelům se používají zařízení jako je dieselagregát, elektrocentrála, či kotel na biomasu s plynovou turbínou pro výrobu elektrické energie apod. Tedy v porovnání s ostrovními systémy využívajícími fosilní paliva je vodíkové hospodářství mnohem čistší a šetrnější k životnímu prostředí. Ostrovní systémy využívající vodíkové hospodářství mají výhodu v porovnání s jinými ostrovními systémy v tom, že produkují nulové množství provozních emisí CO_2. Za předpokladu, že je vodík vyráběn pomocí obnovitelných zdrojů energie, jeho využitím následně nevzniká emise CO_2.

Ve výpočtech není uvažována svázaná produkce CO_2 na výrobu některých komponent systému, která vyžaduje relativně složitý postup výpočtu.

Palivo nebo energie	t CO_2/MWh[1])
černé uhlí	0,330
hnědé uhlí	0,352
koks	0,385
hnědouhelné brikety	0,346
topný a ostatní plynový olej	0,267
topný olej nízkosirný (do 1% hm.síry)	0,279
topný olej vysokosirný (nad 1% hm.síry)	0,279
zemní plyn	0,200
zkapalněný ropný plyn (LPG)	0,237
elektřina	0,860

Obrázek 46 - Emisní faktory dle druhu paliva či energie

Posouzení hodnoty měrné emise CO_2 dle vyhlášky č. 140/2021 Sb.

Dále bych zde chtěl uvést několik příkladů řešení komplexu, kdyby byl připojen na veřejnou síť, a to pro různá paliva a dopad na produkci emisí CO_2 ekvivalentní.

Varianta	Typ potřebné energie	Roční potřeba energie ze sítě [MWh/rok]	Palivo	Faktor [t.CO_2/MWh.rok]	**Celkem [t.CO2/rok]**
Tepelné čerpadlo + FVE + elektrická energie ze sítě	Teplo celkem Elektrická energie	37,3	elektřina	0,86	**32,09**
Plynový kondez. kotel + FVE + elektrická energie ze sítě	Teplo celkem	108,3	zemní plyn	0,20	**28,64**
	Elektrická energie	8,1	elektřina	0,86	

Tabulka 26 - Výpočet emisí CO2 dle variant

Závěr

Závěrem bych chtěl shrnout výsledky, závěry či doporučení, které plynou z mé práce.

Přechod na vodík jako zdroj energie vyžaduje změny v celé energetické infrastruktuře. Distribuční sítě a koncové prvky jsou klíčové pro tento proces, protože jsou nezbytné pro přenos a distribuci vodíku. Co se týče koncových prvků, jsou zde již k dispozici některé vodíkové spotřebiče. Například kotle jsou již připraveny na směs zemního plynu a vodíku v poměru 1:4, může se lišit dle výrobce. Klíčovým komponentem v těchto zařízeních je hořák. Nicméně výroba a nákup těchto prvků může být stále nákladná, což může být pro mnohé domácnosti a firmy limitující faktor.

Vodík má jako zdroj energie pro systémy budov několik výhod, jako hlavní výhodu bych označil to, že při využití vodíku nevznikají žádné emise CO_2 ani další škodlivé látky. Tato vlastnost z něj činí ideální bezemisní zdroj energie.

Jako další výhody považuji:

- Vodík má velmi vysokou energetickou hustotu, což znamená, že při jeho spalování se uvolní mnoho energie, a to umožňuje využití vodíku jako účinného zdroje energie.
- Vodík může být využíván v mnoha různých oblastech včetně vytápění budov, výroby elektřiny, ale také jako palivo pro vozidla.
- Vodík může být skladován ve formě stlačeného plynu nebo kapaliny, což znamená, že je snadno skladovatelný a transportovatelný. Důležitým parametrem je pracovní tlak, tedy energie a zařízení potřebné pro stlačení. Nejvíce prostorově náročným prvkem systému je zásobník pro uložení vyrobeného vodíku.
- Vodík může být vyráběn z obnovitelných zdrojů energie, jako jsou solární panely nebo větrné turbíny či jiné obnovitelné zdroje energie, což z něj dělá udržitelný a ekologický zdroj energie.

Vzhledem k těmto výhodám se může vodík stát více atraktivním zdrojem energie pro systémy budov.

Jako hlavní nevýhodu systému vidím účinnost výroby vodíku a jeho následné využití pro palivový článek. Z hlediska účinnosti výroby vodíku a jeho využití v palivovém článku je elektrolýza v současnosti považována za relativně energeticky náročnou metodu výroby vodíku. Účinnost elektrolýzy se pohybuje v rozmezí 70-80 %. Na druhé straně je účinnost palivového článku mnohem vyšší a dosahuje až 60-70 %. To znamená, že až 60-70% energie uložené ve vodíku může být přeměněno na elektřinu a teplo.

Z práce je patrné, jak velký význam má zařazení tepelného čerpadla do vodíkového hospodářství. Tepelné čerpadlo využívá tepelnou energii z okolí a zvyšuje ji tak, aby byla vhodná k vytápění či přípravě teplé vody. Pokud se tepelné čerpadlo napájí z obnovitelných zdrojů, jako je vodík z elektrolýzy, pak může být celková energetická efektivita systému vysoká.

Celkově lze tedy říci, že i přestože výroba vodíku pomocí elektrolýzy není zcela efektivní, využití palivového článku dává význam hlavně v období, kdy nelze vyrábět teplo či elektrickou energii s vyšší účinností, například pomocí tepelného čerpadla.

Cena jednotlivých komponentů a celého systému vodíkového hospodářství je v současné době stále velmi vysoká, což může být překážkou pro jeho širší využití. Přesto věřím, že se náklady budou snižovat v důsledku rostoucího zájmu o tuto technologii, a tím se jednotlivé komponenty začnou sériově vyrábět.

Myslím si, že výzvou zůstává zefektivnění některých komponentů v těchto systémech, a to hlavně výroba vodíku a následné využití pro výrobu elektrické energie nebo tepla. Věřím budoucímu vývoji nových technologií a řešením pro udržitelnou energii, které bude mít dopad na podporu významného cíle, kterým je snižování emisí a zlepšení kvality života našeho prostředí.

Seznam literatury a podkladů

[1] P. Mastný, *Obnovitelné zdroje elektrické energie*, Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011.
[2] Jolly, William Lee., „Hydrogen | Properties, Uses, & Facts", *Encyclopedia Britannica*. https://www.britannica.com/science/hydrogen (viděno 5. březen 2023).
[3] „Hledání „zlatého“ vodíku: Stačí ještě jeden objev a změní se svět - Seznam Zprávy". https://www.seznamzpravy.cz/clanek/zahranicni-hledani-zlateho-vodiku-staci-jeste-jeden-objev-a-zmeni-se-svet-228273 (viděno 7. květen 2023).
[4] Ing. Ivan Souček, Ph.D., „Čeká nás „doba vodíková“?" https://energy-hub.cz/en/articles/647104/ceka-nas-doba-vodikova (viděno 5. březen 2023).
[5] „Global hydrogen demand by sector in the Net Zero Scenario, 2020-2030 – Charts – Data & Statistics", *IEA*. https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-hydrogen-demand-by-sector-in-the-net-zero-scenario-2020-2030 (viděno 5. březen 2023).
[6] A. Ferraris, E. D’amore, a G. Chiodi, „[Cytodiagnosis of pulmonary neoplasms]", *G. Ital. Della Tubercolosi*, roč. 13, č. 1, s. 3–10, 1959.
[7] „Domů", *Česká vodíková technologická platforma*. https://www.hytep.cz/ (viděno 6. březen 2023).
[8] Ing. Zdeněk Porš, „Ústav Jaderného Výzkumu Řež, a.s. Divize jaderné bezpečnosti a energetiky. Palivové články." https://docplayer.cz/376545-Ustav-jaderneho-vyzkumu-rez-a-s-divize-jaderne-bezpecnosti-a-energetiky-palivove-clanky-ing-zdenek-pors.html (viděno 6. březen 2023).
[9] „Palivový článek". https://www.devinn.cz/blog/palivovy-clanek (viděno 6. březen 2023).
[10] Miroslav Bleha a Jan Žitka, „Palivový článek v energetice". https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2008/cislo-11/palivovy-clanek-energetice.html (viděno 6. březen 2023).
[11] „Researchers run a gas turbine on pure hydrogen in world first", *New Atlas*, 10. červen 2022. https://newatlas.com/energy/gas-turbine-hydrogen/ (viděno 6. březen 2023).
[12] „Jak funguje první kotel s nulovými emisemi na světě?", 07 2014. http://www.cstz.cz/tisk.php?sl2t=8915&id=468&kp= (viděno 6. březen 2023).
[13] Rahmat Poudineh, „Cost-competitive green hydrogen: how to lower the cost of electrolysers?", *Oxford Institute for Energy Studies*. https://www.oxfordenergy.org/publications/cost-competitive-green-hydrogen-how-to-lower-the-cost-of-electrolysers/ (viděno 7. březen 2023).
[14] „Residential building fully reliant on hydrogen for space heating, hot water", *pv magazine International*, 10. leden 2022. https://www.pv-

magazine.com/2022/01/10/residential-building-fully-reliant-on-hydrogen-for-space-heating-hot-water/ (viděno 12. březen 2023).
[15] „SmartQuart", *SmartQuart*. https://smartquart.energy/english-abstract/ (viděno 12. březen 2023).
[16] Kathrain Graubaum, „A hydrogen village in trial operation". https://www.invest-in-saxony-anhalt.com/report-invest/a-hydrogen-village-in-trial-operation (viděno 12. březen 2023).
[17] F. F. www.fg.cz, 2017 a s, „Obnovitelné zdroje energie", *ÚJV Řež, a. s.* https://www.ujv.cz/cs/produkty-a-sluzby/veda-a-vyzkum/oze (viděno 12. březen 2023).
[18] „Phi Suea House". https://www.phisueahouse.com/ (viděno 13. březen 2023).
[19] „A True Pioneer Goes Off-Grid". https://www.linkedin.com/pulse/true-pioneer-goes-off-grid-michael-jensen (viděno 13. březen 2023).
[20] „Hydrogen". https://www.baxi.co.uk/about-us/the-future-of-heat/hydrogen (viděno 12. březen 2023).
[21] B. G. Limited, „Hydrogen Boiler Manufacturers: Baxi & Worcester Bosch | Boiler Guide". https://www.boilerguide.co.uk/articles/hydrogen-boiler-manufacturers (viděno 12. březen 2023).
[22] „Hydrogen Ready Boilers Costs 2022 - How Much Do They Cost?" https://iheat.co.uk/boiler-help/hydrogen-ready-boiler-costs (viděno 12. březen 2023).
[23] „Hydrogen Boiler | Worcester Bosch". https://www.worcester-bosch.co.uk/hydrogen (viděno 12. březen 2023).
[24] „Fuel cell CHP system inhouse5000+ supplies with electricity & heat", *Effiziente Energiesysteme & Brennstoffzellensysteme*. https://www.inhouse-engineering.de/en/fuel-cell/chp/ (viděno 12. březen 2023).
[25] „Water E-Motion | Giacomini". https://www.giacomini.com/ (viděno 12. březen 2023).
[26] HomePowerSolutionsBE, „Product", *Home Power Solutions*. https://www.homepowersolutions.de/en/product/ (viděno 12. březen 2023).
[27] „Powerwall", *Tesla*. https://www.tesla.com/powerwall (viděno 12. březen 2023).
[28] „Applications", *Enapter*. https://www.enapter.com/applications (viděno 12. březen 2023).
[29] „LAVO | LAVO". https://www.lavo.com.au/ (viděno 12. březen 2023).
[30] Gabbo, „Verkon". https://www.verkon.cz/ (viděno 12. březen 2023).
[31] „Zařízení pro výrobu demineralizované vody AQUAL 2x". https://aqual.cz/uprava-vody-pro-laboratore/zakladni-typy-vykon-do-18-l-hod/aqual-2x (viděno 12. březen 2023).
[32] A. Moravec, „Biometan jako možnost ozelenění zemního plynu", *Biom.cz*, roč. 23, č. 10, říj. 2021, [Online]. Dostupné z: https://biom.cz

[33] „Bioplyn a bioplynové stanice v ČR", *oEnergetice.cz*, 31. srpen 2015. https://oenergetice.cz/technologie/bioplyn-a-bioplynove-stanice-v-cr/ (viděno 13. březen 2023).
[34] A. B. Makar, K. E. McMartin, M. Palese, a T. R. Tephly, „Formate assay in body fluids: application in methanol poisoning", *Biochem. Med.*, roč. 13, č. 2, s. 117–126, čer. 1975, doi: 10.1016/0006-2944(75)90147-7.
[35] M. Jiang, X. Yu, H. Yang, a S. Chen, „Optimization Strategies of Preparation of Biomass-Derived Carbon Electrocatalyst for Boosting Oxygen Reduction Reaction: A Minireview", *Catalysts*, roč. 10, č. 12, Art. č. 12, pro. 2020, doi: 10.3390/catal10121472.
[36] J. Karlík, „Jiří Karlík: Spotřeba bioLPG v Česku loni vzrostla. V další ekologizací LPG se počítá s rDME", *Ekolist.cz*, 29. leden 2022. https://ekolist.cz/cz/publicistika/nazory-a-komentare/jirin-karlik-spotreba-biolpg-v-cesku-loni-vzrostla.v-dalsi-ekologizaci-lpg-se-pocita-s-rdme (viděno 12. březen 2023).
[37] J. Brázda, T. Ducháč, T. Caha, S. Brno, J. Kříž, a M. O. Ptáček, „2. Projektové a finanční řízení komunální a komunitní energetiky", 2021.
[38] Ing. Roman Vavřička, Ph.D., „Metody návrhu zásobníku teplé vody", *TZB-info*. https://voda.tzb-info.cz/priprava-teple-vody/7885-metody-navrhu-zasobniku-teple-vody (viděno 19. březen 2023).
[39] Tomáš Matuška, „Zásobováním teplem - výpočet potřeby tepla",
[40] „JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission". https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#PVP (viděno 2. duben 2023).
[41] „OptimUS US-B1-100-Pylon Technologies Co., Ltd." https://en.pylontech.com.cn/pro_detail.aspx?id=138&cid=24 (viděno 2. duben 2023).
[42] Bc. Michal Bajtalon a Ing. Jiří Beranovský, Ph.D., MBA, „Akumulace přebytků z OZE do vodíku".
[43] *prof. Matolín: Vodík - palivo pro udržitelnou energetiku [Fyz. čtvrtek – online]*, (2021). Viděno: 10. duben 2023. [Online Video]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=spVuaexlO5k
[44] „Compressed hydrogen storage", *MAHYTEC*. https://www.mahytec.com/en/compressed-hydrogen-storage/ (viděno 10. duben 2023).
[45] „Asme Industrial Air Storage Tank Receiver High Pressure Hydrogen Storage Tank - Buy Asme Industrial Air Storage Tank Receiver High Pressure Hydrogen Storage Tank,Hydrogen Storage Tank,Air Storage Tank Receiver Product on Alibaba.com". https://www.alibaba.com/product-detail/Industrial-Gas-Tank-High-Pressure-Hydrogen_60524790105.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.7c5f6fceclxHkG (viděno 16. duben 2023).
[46] „50000 Liter 50 M3 25 Ton Hydrogen Gas Storage Tank - Buy Hydrogen Gas Storage Tank,Lpg,Lpg Tank Product on Alibaba.com".

https://www.alibaba.com/product-detail/50000-liter-50-m3-25-ton_60460941815.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.5a444c6fqE7WcT (viděno 16. duben 2023).
[47] „Power Generation System 100 | PowerCell Group", *Powercellgroup*. https://powercellgroup.com/product/power-generation-system-100/ (viděno 24. duben 2023).
[48] doc. Ing. Tomáš Matuška, Ph.D., „Tepelné sítě hydraulické výpočty",
[49] „Flexibilní předizolované potrubí", *NRG FLEX*. https://www.nrgflex.cz/flexibilni-predizolovane-potrubi/ (viděno 30. duben 2023).
[50] „LVT 3000 d1250 2V - Akumulační nádrž se 2 výměníky". https://akumulacni-nadrz.cz/lvt-3000-d1250-2v.php (viděno 24. duben 2023).
[51] „Tepelné čerpadlo - vše důležité | STIEBEL ELTRON". https://www.stiebel-eltron.cz/cs/produkty-a-reseni/obnovitelne_zdrojeenergie/tepelna_cerpadla.html (viděno 25. duben 2023).
[52] „Tepelné čerpadlo vzduch-voda HPA-O 13 C Premium-STIEBEL ELTRON". https://www.stiebel-eltron.cz/cs/produkty-a-reseni/obnovitelne_zdrojeenergie/tepelna_cerpadla/tepelna_cerpadlavzduch-voda/hpa-o-7-13-c-premium/hpa-o-13-c-premium.html (viděno 26. duben 2023).
[53] „Hydrogen - MAXIMATOR Hochdrucktechnik GmbH". https://www.maximator-ht.com/en/hydrogen/ (viděno 29. duben 2023).
[54] Regulus, „Akumulační nádrž s nerezovým výměníkem TV HSK 390 P". https://www.regulus.cz/cz/akumulacni-nadrz-s-nerezovym-vymenikem-tv-hsk-390-p (viděno 2. květen 2023).
[55] „DUPLEX 280, 380, 580 ECV5 / ECV5-E - ATREA s.r.o." https://www.atrea.cz/cz/duplex-280-380-580-ecv5 (viděno 2. květen 2023).
[56] „EK a dodavatelé elektrolyzérů: Velkovýroba zeleného vodíku", 10. květen 2022. https://www.esg-investice.cz/velkovyroba-zeleneho-vodiku/ (viděno 8. květen 2023).
[57] „Energetika v číslech". https://www.eru.cz/energetika-v-cislech (viděno 8. květen 2023).

Použité normy a nařízení:

ČSN 73 0331-1 Energetická náročnost budov - Typické hodnoty pro výpočet - Část 1: Obecná část a měsíční výpočtová data

ČSN EN ISO 13 790 Energetická náročnost budov - Výpočet spotřeby energie na vytápění a chlazení

ČSN EN ISO 52016-1 Energetická náročnost budov – Potřeba energie na vytápění a chlazení, vnitřní teploty a citelné a latentní tepelné výkony – Část 1: Výpočtové postupy

ČSN EN 12 831-1 Energetická náročnost budov – Potřeba energie na vytápění a chlazení, vnitřní teploty a citelné a latentní tepelné výkony – Část 1: Výpočtové postupy

ČSN 06 0320 Tepelné soustavy v budovách - Příprava teplé vody - Navrhování a projektování

ČSN 07 8304 Tlakové nádoby na plyny - Provozní pravidla

ČSN EN 17123 Plynové infrastruktury – Vodíkové infrastruktury – Návrh, konstrukce, bezpečnost a provoz

ČSN EN 15894 Vodíkové sítě pro pohonné hmoty – Návrh, konstrukce, bezpečnost a provoz

ČSN EN 16111Bezpečnostní požadavky na přípravu a použití plynu v budovách

ČSN EN 62282-3-100 Palivové články – Část 3-100: Vodíkové palivové články – Bezpečnost

ČSN EN 62424 Systémy pro měření a řízení spotřeby energie – Systémy pro správu energie ve stavebnictví

ČSN EN ISO 14687-2 Plynové kvality – Vodík pro energetické aplikace – Část 2: Palivové vodíkové nádrže

Vyhláška č. 140/2021 Sb. - Vyhláška o energetickém auditu

Vyhláška č. 141/2021Sb. - Vyhláška o energetickém posudku

Seznam obrázků, fotek

Obrázek 1 - druhy vodíku dle barevného označení [4] 14
Obrázek 2 - Výroba vodíku dle technologie výroby [5] 14
Obrázek 3 - Výroba vodíku dle použitých surovin pro výrobu [5] 15
Obrázek 4 - Způsoby výroby vodíku [6] 15
Obrázek 5 - Vodíko-kyslíkový palivový článek [10] 19
Obrázek 6 - vývoj ceny zeleného vodíku [13] 22
Obrázek 7 - Schéma elektrolyzéru v ÚJV Řež [17] 25
Obrázek 8 - situace komplexu se zaznačením základních budov [18] 26
Obrázek 9 - Foto hlavního objektu s fotovoltaickými panely [18] 27
Obrázek 10 - schéma vodíkového systému [18] 28
Obrázek 11 - Schéma tzb systému [19] 30
Obrázek 12 - Schéma fungování kondenzačního kotle [25] 32
Obrázek 13 - Schéma zapojení kondenzačního kotle [25] 33
Obrázek 14 - Provoz zařízení léto/zima [26] 33
Obrázek 15 - Schéma zařízení včetně jeho komponentů [26] 34
Obrázek 16 - schéma domácí vodíkové baterie [29] 35
Obrázek 17- Lokální výroba + palivový článek 40
Obrázek 18 - Lokální výroba + kotel na vodík 40
Obrázek 19 - Centrální výroba + kotel na vodík 41
Obrázek 20 - Centrální výroba + palivový článek 41
Obrázek 21 - situační výkres 1:600 45
Obrázek 22 - Půdorys 1.NP 1:100 47
Obrázek 23 - Půdorys 2.NP 1:100 47
Obrázek 24 - Příčný řez 1:100 48
Obrázek 25 - uliční pohled 1:100 48
Obrázek 26 - roční výkyvy potřeby tepla na ohřev TV [39] 54
Obrázek 27 - Energetické schéma komplexu varianta 1 59
Obrázek 28 - Energetické schéma komplexu varianta 2 60
Obrázek 29 - Výstup z výpočetního nástroje-spalování vodíku + tepelné čerpadlo 63

Obrázek 30 - Výstup z výpočetního nástroje-palivový článek 64
Obrázek 31 - Výstup z výpočetního nástroje-palivový článek + tepelné čerpadlo 65
Obrázek 32 - Schéma komplexu dle orientace střech.....67
Obrázek 33 - Rozmístění panelů na ploše střechy 68
Obrázek 34 - Bateriové uložiště PylonTech [41].....74
Obrázek 35 - Roční energetická bilance 250 bar + tepelné čerpadlo 79
Obrázek 36 - Závislost přetlaku vodíku a jeho dalších vlastnostech [43] 83
Obrázek 37 - Svazek tlakových láhví [44] 84
Obrázek 38 - Velkokapacitní zásobníky na H2 [45] 85
Obrázek 39 -Tabulka dimenzí od výrobce.....87
Obrázek 40 - Schéma průřezu distribučního potrubí [49].....90
Obrázek 41 - Tabulka dimenzí od výrobce [49] 91
Obrázek 42 - Možné zavěšení jednotky tepelného čerpadla [52].....93
Obrázek 43 - Vysokotlaký pístový kompresor [53].....94
Obrázek 44 - Výkonové parametry [55].....95
Obrázek 45 - Změny energetický mix rok 2021 a 2022 [57] 100
Obrázek 46 - Emisní faktory dle druhu paliva či energie 101

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Složení bioplynu [%] [32].....37
Tabulka 2 - Součinitelé prostupu tepla.....46
Tabulka 3 - tepelná ztráta větráním 49
Tabulka 4 - Tepelná ztráta prostupem + větrání 1 50
Tabulka 5 - Tepelná ztráta prostupem + větrání 2 50
Tabulka 6 - Tepelná ztráta prostupem + větrání 3 51
Tabulka 7 - Tepelná ztráta komplexu 51
Tabulka 8 - Potřeba tepla s tepelnými zisky.....52
Tabulka 9 - Potřeba tepla bez tepelných zisků 52
Tabulka 10 - Energetická bilance z NKN 55
Tabulka 11 - Dílčí dodaná energie z NKN 55
Tabulka 12 - Potřeby energie RD 56

Tabulka 13 - Potřeby energie komplexu 56
Tabulka 14 - Měsíční potřeby energie komplexu 56
Tabulka 15 - Počet střech a instalovaných panelů..... 68
Tabulka 16 - Měsíční výstup energie z FV systému 69
Tabulka 17 - Výroba energie ve čtyřech dnech v roce [Wh] 70
Tabulka 18 - Potřebná kapacita baterie [Wh] 73
Tabulka 19 - Roční energetická bilance 350 bar 75
Tabulka 20 - Roční energetická bilance 65 bar 76
Tabulka 21 - Parametry PEM elektrolyzéru [42] 82
Tabulka 22 - Návrhová tabulka pro distribuční síť dle úseků 91
Tabulka 23 - Investiční náklady pro standartní řešení 97
Tabulka 24 – Předpokládané poplatky za elektrickou energii distributorovi. 97
Tabulka 25 - Investiční náklady navrhované řešení 98
Tabulka 26 - Výpočet emisí CO2 dle variant 102

Seznam grafů

Graf 1 - Roční graf vyrobené energie ve variantách 69
Graf 2 - Výroba a spotřeba 1.února 71
Graf 3 - Výroba a spotřeba 1.května 71
Graf 4 - Výroba a spotřeba 1.srpna 72
Graf 5 - Výroba a spotřeba 1.listopadu 72
Graf 6 - Potřeba energii komplexu [kWh/měsíc] 77
Graf 7 - Výroba el. energie a spotřeby komplexu [kWh/měsíc] 77
Graf 8 - Výroba energie dle druhu spotřeby [kWh/měsíc] 78
Graf 9 - Výroba vodíku v závislosti na měsících v roce 78
Graf 10 - Výroba energie dle druhu výroby [kWh/měsíc] 80
Graf 11 - Výroba vodíku v závislosti na měsících v roce 80
Graf 12 - Výroba vodíku a stav kapacity uložiště H2 [kg] 86
Graf 13 - Výroba vodíku a stav kapacity uložiště H2 [m^3] 86

Seznam příloh

Příloha 1 - Výkresová část

- Situační výkres - rozmístění zástavby
- Energetické schéma systému bez tepelného čerpadla
- Energetické schéma systému s tepelným čerpadlem
- Výstup z výpočetního nástroje pro předběžný návrh FVE
- Situační výkres - umístění FVE
- Distribuční soustava - rozdělení na úseky
- Půdorys centrální tech. budovy
- Řez centrální tech. budovy
- Půdorys RD 1.NP - schématické umístění

Příloha 2 – Technické listy referenčních výrobků

- Technický list bateriové uložiště
- Technický list fotovoltaický panel
- Technický list palivový článek
- Technický list tlaková nádoba 500bar
- Technický list tepelné čerpadlo
- Technický list akumulační nádrž