

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNIKY PROSTŘEDÍ

**SIMULAČNÍ POSOUZENÍ PROVOZU
AKTIVNÍHO FASÁDNÍHO MODULU
PRO RYCHLOU A KOMPLEXNÍ
RENOVACI**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. Jan Jírovec

1 – TPR – 2022

Souhrn

Cílem této práce je posouzení energetické náročnosti vzorové budovy před a po použití inovativního fasádního modulu, který v sobě zahrnuje tepelnou izolaci, fotovoltaiku a lokální větrací jednotku s termoelektrickou úpravou přiváděného vzduchu. Vhodnost použití fasádního modulu je posouzena na základě simulací v prostředí TRNSYS, které jsou provedeny pro různé klimatické podmínky Evropy.

Summary

Aim of this thesis is an assessment of energy performance of the model building before and after using an innovative facade module which includes thermal insulation, photovoltaics and a local ventilation unit with thermoelectric air conditioning of the inlet air. The suitability of the facade module is assessed based on a simulation process in TRNSYS which was done for different climate conditions of Europe.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Simulační posouzení provozu aktivního fasádního modulu pro rychlou a komplexní renovaci“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Vojtěcha Zavřela, PhD., s použitím literatury uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze dne:

Bc. Jan Jírovec

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu Ing. Vojtěchu Zavřelovi, PhD. za pomoc s vypracováním této práce.

Dále bych rád poděkoval své rodině a přátelům za jejich vytrvalou podporu, kterou mi během mého studia věnovali.

Obsah

1.	Soupis použitého značení	6
2.	Úvod.....	7
3.	Současný stav rezidenčních staveb v České republice.....	8
4.	Možnosti revitalizace rezidenčních budov	12
3.1.	Státní podpora v rámci České republiky	12
3.2.	Integrace fotovoltaiky do obálky budov.....	12
3.3.	Integrace prvků techniky prostředí do obálky budov.....	17
5.	Popis studovaného fasádního systému a modelová situace.....	22
4.1	Studovaný fasádní systém	22
4.2	Popis modelové situace	24
4.3	Použité simulační nástroje.....	25
4.3.1	Prostředí IDA ICE.....	25
4.3.2	Prostředí TRNSYS	25
4.3.3	Kombinovaný postup při simulaci	25
4.4	Sledované metriky.....	26
4.4.1	Komfort vnitřního prostředí a kvalita vnitřního vzduchu	26
4.4.2	Primární energie	27
6.	Simulační model, scénáře a vstupní předpoklady	28
5.1.	Simulační model	28
6.1.1.	Simulační model kvality vnitřního vzduchu	28
6.1.2.	Simulační model energetické náročnosti a tepelného komfortu.....	30
5.2.	Scénáře dle stavu zástavby.....	30
5.3.	Scénáře dle lokace.....	32
5.4.	Scénáře dle vlivu orientace fasády	34
5.5.	Scénáře dle užívání objektu	34
7.	Výsledky simulací.....	38
7.1.	Simulace proudění a kvality vzduchu ve vnitřním prostředí.....	38
7.2.	Simulace energetické náročnosti a tepelného komfortu.....	40
8.	Diskuse.....	52
9.	Závěr	54
10.	Literatura.....	56
11.	Seznam legislativy	61
12.	Seznam technických norem.....	61
13.	Seznam příloh	61

1. Soupis použitého značení

Značka	Veličina	Rozměr
U	Součinitel prostupu tepla	$[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$
q_a	teplo přijaté	$[\text{W}]$
q_e	teplo odebrané	$[\text{W}]$
θ_m	tepelný odpor článku	$[\text{K}/\text{W}]$
α_m	Seebeckův koeficient	$[\text{V}/\text{K}]$
T_a	teplota na ohřívané straně článku	$[\text{K}]$
T_e	teplota na ochlazované straně článku	$[\text{K}]$
I	elektrický proud	$[\text{A}]$
R_m	elektrický odpor článku	$[\Omega]$

2. Úvod

Cílem této práce je simulační posouzení funkčnosti použití inovativního víceúčelového fasádního modulu s termoelektrickým ohřevem a chlazením přiváděného vzduchu pro různé klimatické podmínky Evropy. Výkonnostní parametry fasádního modulu byly studovány na vzorové budově. Zkoumaný fasádní modul je určen primárně k renovaci stávajících budov, a proto je simulace provedena pro různé varianty vnější obálky budov lišící se především tepelně technickými vlastnostmi. Toto nastavení reprezentuje rozdílné stáří budov, na jejichž základě probíhá hodnocení výkonnosti fasádního modulu. V rámci simulační studie se chování fasádního modulu vyhodnocuje pro všechny orientace fasády vůči světovým stranám a pro různé stínění okolní zástavbou.

Práce samotná je rozdělena do dvou částí. V rámci teoretické části byla v kapitole 2 zpracována rešerše zabývající se stavem stávající zástavby, potenciálu pro renovaci fondu budov a pochopením jevů, které negativně ovlivňují kvalitu vnitřního prostředí. Dále je v rámci rešeršní části v kapitole 3 uveden přehled možné podpory pro renovaci stavebního fondu a přehled inovativních technických systémů pro renovace budov na trhu již dostupných, nebo stále vyvíjených, které vedou nejen k energetickým úsporám, ale také ke zvýšení kvality vzduchu ve vnitřním prostředí. Na rešerši pak navazuje praktická část práce, ve které je v kapitole 4 popsán výběr simulačních nástrojů, které jsou pro účely této studie použity. Je zde rovněž popsán postup simulací studovaného fasádního modulu s termoelektrickou úpravou přiváděného vzduchu. Samotný průběh simulací je předmětem páté kapitoly. V šesté kapitole jsou uvedeny výsledky simulací všech uvažovaných simulačních stavů. Pro přehlednost jsou výsledky zpracovány zvlášť pro každou z lokací. Pro potřebu jejich porovnání jsou zobrazeny i ve společném grafu. Na sedmou kapitolu, kde jsou výsledky simulací diskutovány, pak navazuje samotný závěr práce, ve kterém jsou zhodnoceny výsledky celé diplomové práce.

3. Současný stav rezidenčních staveb v České republice

Vzhledem ke snaze o dosažení co nejnižší energetické náročnosti budov a čím dál více se zpřísnující legislativě je, a do budoucna čím dál více bude, nutné hledat nové způsoby zajištění vnitřní kvality vzduchu a tepelného komfortu osob ve vnitřním prostředí. Dle odhadů bylo v EU zhruba 75 % stávajících budov postaveno před rokem 1990 (tedy s výrazně horšími tepelně technickými vlastnostmi) a přibližně 97 % objektů nevyhovuje zpřísněným standardům, které mají vést k naplnění vize o dekarbonizaci budov do roku 2050. [1] Má-li být tato vize naplněna, nelze se zaměřit pouze na výstavbu nových objektů – důležitá bude i kvalitní a zejména rychlá renovace budov již stávajících.

Dle dostupných dat Českého statistického úřadu patřilo v České republice k roku 2021, kdy byla data v rámci Sčítání lidu nasbírána, do domovního fondu 2 353 024 domů. V tabulce 1 je od roku 1970 patrný stálý trend rozšiřování bytového fondu v rámci České republiky. S dalším rozšiřováním bytového fondu bude tedy v budoucnu budov, které budou vyžadovat revitalizaci na vyšší technický standard, ještě výrazněji měrou přibývat.

Tab. 1; Stav bytového fondu ČR [2]

Rok	Domovní fond [mil. domů]
1970	1,77
1980	1,83
1991	1,87
2001	1,97
2011	2,16
2021	2,35

Pro představu o energetické náročnosti budov je lépe vypovídající jejich rozložení dle stáří výstavby zobrazené v tabulce 2. Z rozložení je patrné, že z celkového množství postavených nebo zrekonstruovaných budov jich spadá 40 % do období 1945 až 1990 a 27 % dokonce do období ještě před rokem 1945. Do porevolučního období, od roku 1990 do současnosti, připadá 33 % stávajících budov, přičemž 22 % jich bylo postaveno nebo zrekonstruováno v rozmezí let 1990 až 2010.

Tab. 2; Stáří bytového fondu ČR [3]

Období výstavby	Počet domů [tis. domů]
1919 a dříve	239
1920–1945	336
1946–1970	343
1971–1980	276
1981–1990	217
1991–2000	187
2001–2010	274
2010 - současnost	217

Na základě předpokladu, že tepelně technické vlastnosti budov odpovídají standardům období, ve kterých objekty vznikaly nebo kdy byly rekonstruovány, si lze vytvořit alespoň přibližný obrázek i o technickém stavu budov a kvalitě vnější obálky. O vývoji tepelně technických vlastností vypovídají průměrné hodnoty součinitele prostupu tepla uvedené v tabulce 3.

Tab. 3; Průměrný součinitel prostupu tepla U obálkou budovy v průběhu let výstavby [1]

Období výstavby	1945	1945–1969	1970–1979	1980–1989	1990–1999	2000–2010
Průměrná hodnota součinitele prostupu tepla U [W/m ² .K]	2,07	1,95	1,74	1,44	1,2	0,89

V současné době je dle ČSN 73 0540-2 (Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky. Praha: ČNI, 2011) požadovaná hodnota součinitele prostupu tepla vnější stěnou budovy $U = 0,30 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. S ohledem na stáří rezidenčních budov a jejich zastoupení v české zástavbě je tedy patrné, že prostor pro zlepšení a úspory v energetické náročnosti budov je značný, a proto je třeba této problematice věnovat patřičnou pozornost.

Pro lepší pochopení aktuálního stavu v České republice je vhodné srovnání s ostatními státy Evropské unie. Z hlediska energetické náročnosti na potřebu vytápění, a potažmo tedy z hlediska kvality tepelně technických vlastností obálky budov, lze v rámci Evropy stavby srovnat například pomocí internetové databáze Tabula. [4] V tabulce 4 jsou uvedeny hodnoty pro jednotlivá období výstavby z vybraných států Evropské unie. Pro srovnání bylo vybráno Německo, se kterým se lze srovnávat alespoň co se zeměpisné polohy týče, a dále Španělsko a Švédsko, které naopak reprezentují odlišné klimatické podmínky odpovídající jižní a severní Evropě.

Tab. 4; Srovnání potřeby tepla na vytápění budov v daných státech [4]

Stát		1946-1960	1961-1980	1981-1994	1995-2010
Česká republika [kWh/m ² .rok]	Vytápění	172,8	167,4	129,3	91,4
	Primární energie	268,4	261,8	217,8	135,4
Německo [kWh/m ² .rok]		1949-1957	1958-1968	1984-1994	2002-2009
	Vytápění	140,3	115,5	108,1	58
	Primární energie	225,7	199,7	191,6	102,3
Španělsko [kWh/m ² .rok]		1937-1959	1960-1979	1980-2006	-
	Vytápění	90,6	77	29,5	-
	Primární energie	142,6	126,3	68,9	
Švédsko [kWh/m ² .rok]		-	1961-1975	1976-1985	1996-2005
	Vytápění	-	173,8	144,5	134
	Primární energie		191,3	171,7	160,8

Uvedené hodnoty jsou spíše orientační, typové stavby pro dané země nejsou srovnávány dle stejně vymezeného časového období, hodnoty se samozřejmě také liší vlivem rozdílného klimatu. Přesto nám tato databáze poskytuje srovnání napříč evropskými státy a informace o stavu výstavby z období jejího vzniku.

Aktuální požadavky energetické náročnosti novostaveb v České republice jsou stanoveny vyhláškou č. 264/2020 Sb. o energetické náročnosti budov. Pro rodinné domy s téměř nulovou spotřebou energie je pro potřebu primární energie požadovaná hodnota 75 kWh/m².rok. V případě Švédska je požadovaná potřeba primární energie pro rodinný dům 90 kWh/m².rok. Německo pro nově postavené rodinné domy ve standardu budov s téměř nulovou spotřebou energií požaduje splnění potřeby primární energie 63,9 kWh/m².rok.[5] Z hodnot je patrné, že v příštích letech bude nutné výrazně zvýšit úsilí v oblasti renovace budov, aby se více staveb přiblížilo přísnějším standardům energetické náročnosti, tj. přiblížilo k energeticky úsporným budovám.

4. Možnosti revitalizace rezidenčních budov

3.1. Státní podpora v rámci České republiky

V rámci snahy o zlepšení technického stavu a energetické náročnosti jak stávajících, tak nově stavěných obytných domů odstartoval v roce 2009 v České republice dotační program „Zelená úsporám“. Cílem programu bylo umožnit domácnostem přechod k alternativním zdrojům energie a k zateplení obálky budovy.

Jak se později ukázalo, se zateplováním vnějších obálek budov vyvstal nový problém – zhoršení kvality vnitřního prostředí. Vlivem utěsnění obvodové konstrukce dochází k menší infiltraci a koncentrace CO₂ se z toho důvodu při přirozeném způsobu větrání mnohdy dostane vysoko nad přípustné hygienické limity. Společně se zateplováním vnější obálky budovy je tedy vhodné řešit i nucené větrání objektu. V reakci na problém s kvalitou vzduchu uvnitř obytných domů odstartoval v roce 2014 nový dotační program nazvaný „Nová zelená úsporám“, který již, mimo dalších nově podporovaných oblastí, podporoval i systémy nuceného větrání se zpětným získáváním tepla. V letech 2014 až 2021, kdy probíhala první etapa programu, z něho čerpalo 71 tisíc domácností.

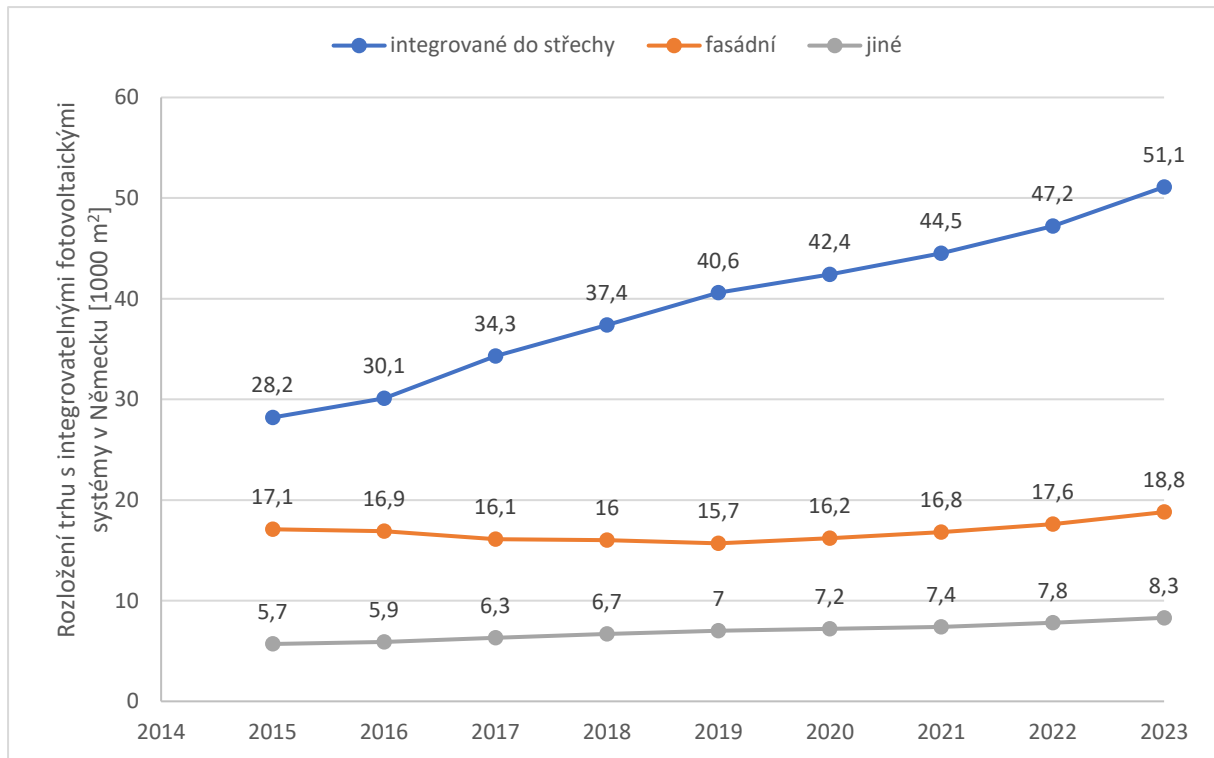
V současné době pokračuje státní podpora formou druhé etapy stávajícího programu „Nová zelená úsporám“ se zaměřením na zateplení rodinných a bytových domů, novostavby rodinných nebo bytových domů v pasivním standardu, solární termické a fotovoltaické systémy, akumulaci dešťové vody, zelené střechy a další. Cílem programu je snížení produkce emisí znečišťujících látek a skleníkových plynů a úspora energií. Zároveň se však tento program snaží stimulovat domácí ekonomiku a nastavit progresivní trend vedoucí k udržitelné budoucnosti. [6]

3.2. Integrace fotovoltaiky do obálky budov

Snížení celkové energetické náročnosti budov lze, mimo zmíněných úsporných opatření, také dosáhnout instalací lokálních obnovitelných zdrojů energie v rámci objektu. Hlavním obnovitelným zdrojem pro tyto účely jsou většinou uvažovány fotovoltaické panely.

Fotovoltaické panely se s ohledem na maximalizaci produkce elektrické energie, na konstrukční možnosti a na jednoduchost instalace umísťují zpravidla pouze na střechy budov. Využitá plocha tedy odpovídá maximálně půdorysné ploše, což ale málokdy odpovídá realitě, neboť je na střechu mnohdy instalovat i další zařízení pro technické vybavení domu – především se jedná o vzduchotechnické a klimatizační jednotky, jednotky pro havarijní větrání, komíny a podobně. Využitelná plocha pro fotovoltaiku je tedy výrazně omezena a instalovaný výkon je nižší navzdory tomu, že velká část venkovní obálky budov zůstává nevyužita. Vzhledem k nutnému přechodu k udržitelnému způsobu nakládání s energií v budovách (včetně lokální produkce), je možné využít nových produktů na trhu, které umožňují integraci fotovoltaických panelů do obálky staveb. Díky novým možnostem už navíc není nutné spoléhat pouze na konvenční fotovoltaické panely, jejichž umístování na fasádu samo o sobě může představovat komplikaci z konstrukčního hlediska. Nové produkty již lze integrovat do samotné obálky budovy např. formou fasádních modulů, selektivních vrstev okenních výplní, apod. [7] [8]

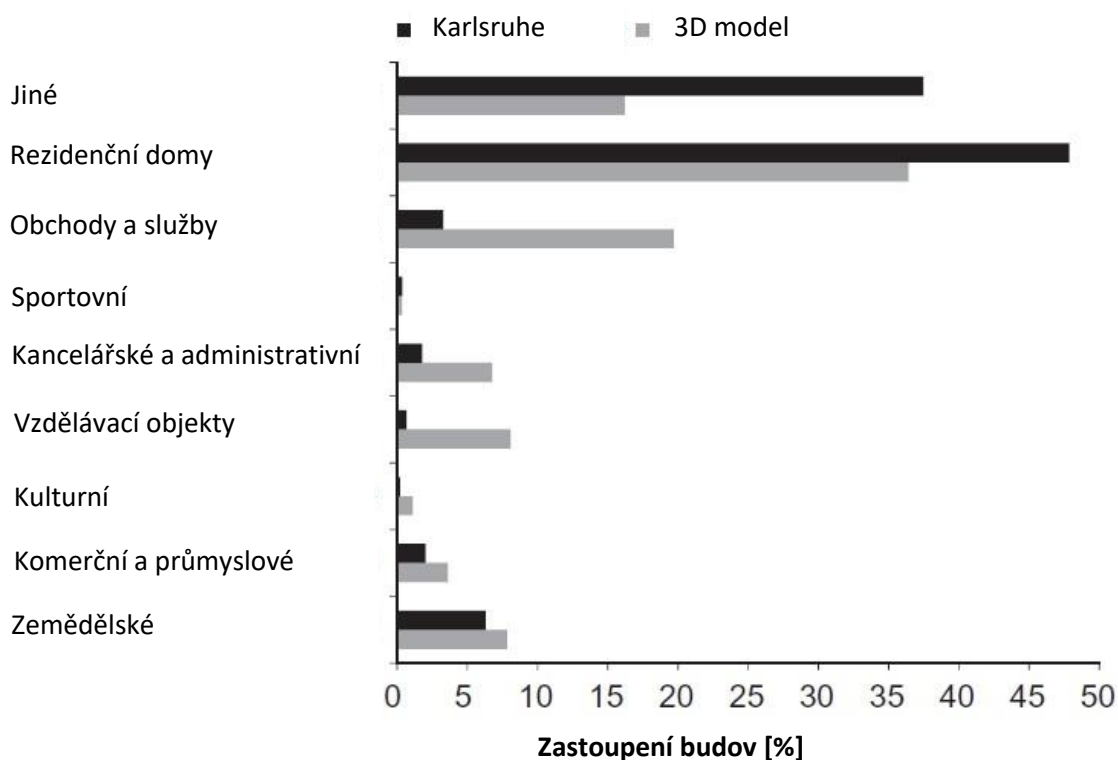
Kuhn a kolektiv [9] ve své publikaci provedli přehled možností pro integraci fotovoltaických systémů do obálky budov a zároveň analyzovali trh s integrovanými fotovoltaickými systémy v Německu, které v roce 2013 spustilo program „Energiewende“ motivující k energetické transformaci a omezení používání jaderných a fosilních paliv. [10] Z jejich zprávy vyplývá, že k roku 2019 bylo v Německu pomocí integrovaných fotovoltaických panelů instalováno 12 MW_p (zhruba 0,3 % celkového instalovaného výkonu fotovoltaiky, který činí 3,94 GW_p), což odpovídá instalované ploše 63 300 m². Autoři výzkumu také na základě meziročního vývoje trhu od roku 2015 predikovali další růst (viz graf 1 na další straně) zastoupení integrovaných fotovoltaických systémů na trhu – od roku 2019 je znázorněn předpokládaný vývoj trhu.



Graf 1; Stav německého trhu s fotovoltaickými systémy a predikce jeho vývoje [9]

Navzdory výhodám, které integrace fotovoltaických panelů přináší (např. prvky pasivního stínění, které dále snižují potřebu chlazení vnitřního prostředí budov), je jejich zastoupení na trhu stále pouhým zlomkem oproti klasickým střešním panelům. Jejich přínos je však ještě stále předmětem studií a ukazuje se, že jejich použití může rozšířit potenciál lokální produkce elektrické energie. Jejich většímu použití stojí v cestě vyšší pořizovací cena oproti klasickým střešním panelům a za menším zájmem veřejnosti může zároveň stát i estetická stránka řešení, která může zásadním způsobem ovlivnit vzhled budov.

Na potenciál fotovoltaických systémů, zejména integrovaných systémů pro fasády domů, se ve své práci zaměřovala Fath [11]. Ve své práci vyjádřila jak ekonomický, tak technologický potenciál instalace fotovoltaiky na střechách a fasádách domů – zaměřila se pouze na povrch budov, volně instalované panely v okolí staveb nebyly brány v úvahu. Ke své studii použila 3D model části centra města Karlsruhe o celkové ploše 2 km², na které stojí 1750 budov. Detaily budov odpovídaly zjednodušené úrovni detailu (tj. LOD 2.0) s respektováním tvaru střechy, ale zanedbáním oken či balkonů. [12] Tato plocha odpovídá zhruba 2 % celého města a jeho zástavbě. Z celkového počtu budov přibližně 35 % z nich svým použitím odpovídalo rezidenční zástavbě (viz obrázek 1 níže).

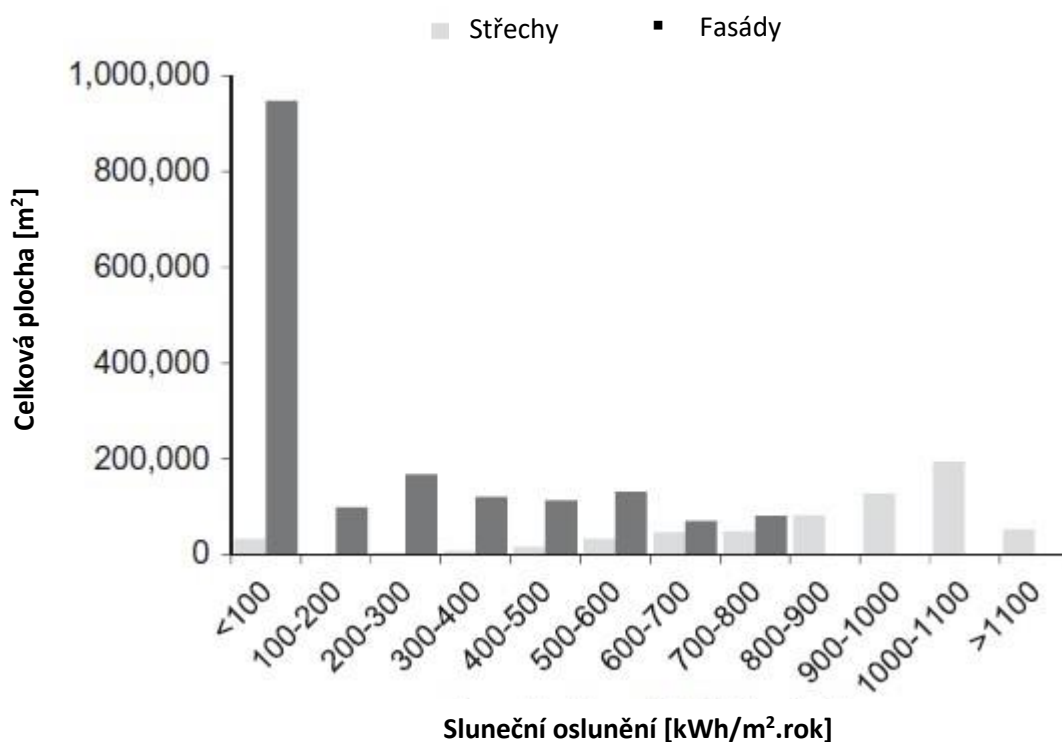


Obr. 1; Srovnání způsobu využití budov v městské zástavbě Karlsruhe a v použitém modelu [11]

Technologický potenciál, jak jej ve své práci Fath použila a definovala, lze rozdělit do dvou podoblastí – místa umístění fotovoltaického panelu na budově a množství produkované elektrické energie. Potenciál na základě umístění panelu vyjadřoval míru slunečního ozáření volného povrchu budovy, který byl k instalaci panelu vhodný. Množství produkované elektrické energie odpovídalo energii generované z dostupné plochy na budově. Celková plocha fasád v modelu odpovídala 1,9 milionu m² a 0,65 milionu m² střech.

Z výsledků simulací v softwaru Radiance, který sloužil k výpočtu slunečního ozáření povrchů v modelu města, vyšel celkový potenciál 930 GWh/rok, z čehož 59 % připadalo na povrch střech a 41 % na fasády staveb. Vzhledem k tomu, že fasády domů odpovídaly svou plochou přibližně 70 % obálky budovy, pro kterou bylo uvažováno s využitím fotovoltaiky, nelze integrované systémy opomíjet (obzvláště u výškových budov, kde tento poměr dále roste a které se v rozvinutých městech objevují čím dál častěji). Z váženého průměru pak průměrné ozáření povrchu střechy odpovídalo 846 kWh/m².rok a povrchu fasády 191 kWh/m².rok.

Z grafu na obrázku 2 níže je patrné, že ačkoliv byla míra slunečního ozáření velké části fasád menší než 100 kWh/m².rok (což ve studii odpovídalo 55 % celkové plochy fasád) a pro použití fotovoltaických systémů tedy těžko použitelná, zhruba 5 % (81 000 m²) odpovídalo ozáření 700 až 800 kWh/m².rok. [11]



Obr. 2; Míra slunečního ozáření povrchu budov ve studii Fath [11]

Fath ve své práci došla simulací k závěru, že instalace fotovoltaických panelů skrývá potenciál v produkci elektrické energie až 80 GWh/rok, z čehož 45 % v použitém modelu odpovídalo obálce budov. Navzdory nižšímu slunečnímu ozáření modelovaných fasád budov se tedy ukázalo, že produkce obnovitelné elektrické energie by mohla být v případě integrace panelů do fasád domů téměř dvojnásobná. Vzhledem k závazkům ke snížení energetické náročnosti budov, které Evropská unie

přijala, a k dosažení cíle o dekarbonizaci budov do roku 2050 [1], se integrace fotovoltaických systémů do konstrukce budov stává jedním z dílčích řešení, jak těchto cílů dosáhnout.

3.3. Integrace prvků techniky prostředí do obálky budov

Vlivem proměnlivých podmínek vnějšího prostředí v průběhu roku je pro dodržení stálých komfortních podmínek ve vnitřním prostředí budov nutné aktivně řídit podmínky vnitřního prostředí – systémy vytápění, chlazení a větrání. V případě rekonstrukce starších staveb se úsilí primárně soustředí na zateplení vnější obálky budovy a snížení tepelných ztrát objektu. Spolu se zateplením je však pro dodržení kvality vnitřního prostředí třeba řešit i systém větrání, příp. chlazení pro eliminaci možného přehřívání rekonstruované budovy. Instalace centrálních systémů je ovšem u stávajících objektů mnohdy velmi komplikovaná a mnohdy nemusí být ani proveditelná, protože nelze realizovat všechny potřebné prostupy stávajícím stavebními konstrukcemi. Pro splnění hygienických limitů vzduchu ve vnitřním prostředí je proto nutné řešit úpravu vzduchu jiným způsobem. Možným řešením, zajišťujícím vysoký standard vnitřního prostředí, je doplnit fasádní zateplovací systémy o aktivní vzduchotechnické prvky s možností úpravy čerstvého vzduchu přiváděného do vnitřního prostředí budovy.

Z konstrukčních a provozních důvodů jsou ovšem možnosti aplikace běžných mechanických systémů techniky prostředí velmi omezené, především pak z hlediska údržby instalovaného decentrálního systému. Integrací standardního chladicího okruhu, který obsahuje řadu rotujících mechanických částí, a spolu se samotným chladivovým okruhem vyžaduje pravidelný servis, se navíc zvyšuje riziko přenosu hluku a vibrací do fasády a vnitřního prostoru. Další problém představuje možný únik chladiva a proto je třeba úpravu přiváděného vzduchu řešit jiným způsobem. Jako možná alternativa konvenčních systémů se nabízí využití termoelektrických článků pracujících na principu Peltierova jevu, které sice nedosahují výkonnosti a účinnosti standardních chladicích zařízení, ale nabízí možnost minimalistického a odolného řešení.

Samotný termoelektrický článek je složen ze dvou polovodičů, které jsou spojeny vodičem v elektrickém obvodu. Při rozdílu teplot se v článku generuje elektrické napětí. Naopak při průchodu elektrického proudu obvodem vzniká v článku

teplotní gradient – jedna strana článku teplo z prostoru absorbuje (chladí) a druhá jej do prostoru odvádí (topí), přičemž při změně polarity zapojení článku se proces obrátí a vystřídají se tzv. chladné a teplé strany článku. Díky tomu lze termoelektrických článků využít jak k ohřevu, tak k ochlazení prostoru dle aktuální potřeby uživatele bez jakýchkoliv mechanických změn (např. přepnutím ventilu apod.).

Chování termoelektrického článku při ochlazování lze z hlediska termodynamické rovnováhy obou jeho stran popsat následujícím způsobem – pro stranu, která teplo přijímá (index a) a která teplo odebírá (index e)

$$q_{a,e} = \frac{\Delta T}{\theta_m} + \alpha_m T_{a,e} I - \frac{I^2 R_m}{2}$$

kde $q_{a,e}$ [W] označuje teplo přijaté/odebrané, θ_m [K/W] je tepelný odpor článku, α_m [V/K] je Seebeckův koeficient, $T_{a,e}$ [K] teplotu na straně ohříváné/ochlazované, I [A] značí elektrický proud procházející článkem, R_m [Ω] jeho elektrický odpor. [14]

Protože lze termoelektrický článek používat v režimu chlazení, hrozí při jeho provozu kondenzace vodních par, což je u integrovaného fasádního modulu nežádoucí. Proto je vhodné, aby model fasádních modulů s termoelektrickou úpravou vzduchu pracoval s kontrolou výpočtu na kondenzaci. Pokud je teplota rosného bodu vzduchu na výstupu z jednotky vyšší než povrchová teplota článku, ke kondenzaci nedochází. Pokud tato nerovnost neplatí a dochází ke kondenzaci, která je uvažována na povrchu chladiče termočlánku, lze výstupní hodnotu měrné vlhkosti vzduchu přepočíst dle následujícího vztahu

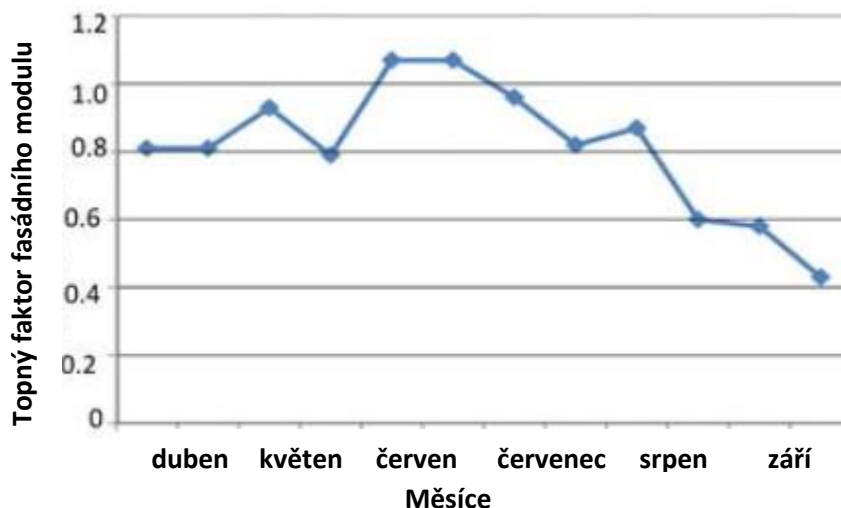
$$x_{TEC,c} - 0,622 \frac{e^{fn(T_{TEC,c})}}{p - e^{fn(T_{TEC,c})}} = 0$$

Kde $fn(T_{TEC,c})$ je empiricky stanovená funkce tlaku nasycených vodních par, definována v příručce ASHRAE 2009. Dále je pro zpřesnění výpočtů vhodné uvažovat korekci zohledňující vliv netěsnosti konstrukce jednotky, kvůli kterým dochází ke ztrátám a výkon jednotky je tak nižší.

Hlavní výhodou termočlánku jsou jeho kompaktní rozměry a absence pohybujících se částí. Oproti konvenčním systémům, jejichž životnost dosahuje 10-15 let, je životnost termoelektrických článků udávaná výrobcem 30 až 40 let.

Další výhodou je fakt, že se jedná o součást pracující se stejnosměrným proudem a v kombinaci s použitím fotovoltaického panelu tedy není zapotřebí elektrického měniče k jeho napájení. Nevýhodou je jeho nižší výkon a nízká účinnost v porovnání s kompresorovým chladicím okruhem. Vývoj fasádních modulů využívající tuto technologii je však stále ve svých začátcích a vhodnost jejich použití se stala v průběhu několika minulých let předmětem několika odborných studií. [14] [15] Například potenciálem jejich využití se zabývala Ibáñez-Puy se svým kolektivem [16]. Ta se ve své práci zaměřila na optimalizaci tradičních ventilovaných fasád (uvažované složení fasády je zobrazeno v příloze č. 1) k dosažení lepší energetické bilance objektu s použitím právě termoelektrické úpravy na principu Peltierova jevu. Adaptabilita vnější obálky byla v tomto případě řešena regulací průtoku vzduchu vzduchovou mezerou u dvojité fasády. V letním období může vzduch proudící v této mezeře částečně odvádět vnitřní tepelné zisky, v průběhu zimy pak v případě uzavření vzduchové mezery naopak teplo akumulovat a zlepšit tak tepelnou bilanci objektu. Pro účel výzkumu byly postaveny dvě měřicí buňky. Jedna byla osazena konvenční vzduchotechnickou jednotkou s možností ohřevu a ochlazení vzduchu, přičemž průtok venkovního vzduchu mezerou ve dvojité fasádě se nedal omezit. V druhé měřicí buňce byl instalován systém termoelektrické úpravy vzduchu (schéma použitého modulu je v příloze č. 2 této práce) a vzduchová mezera ve fasádě se dala uzavřít. Obě stavby byly orientovány na jihozápad a postaveny vzájemně tak, aby jedna nestínila druhé. Orientace byla zvolena jihozápadní z toho důvodu, neboť v simulačním programu Ecotect vykazovala dosažení nejvyšších teplot a jednalo se tedy o teplotně nejvíce namáhanou část budovy. Na teoretickou část této práce pak autorka navázala samotným měřením, jehož výsledky byly zveřejněny v [17].

Topný faktor použité splitové jednotky se v průběhu roku pohyboval v rozmezí 2,6 až 3. V případě fasádního modulu s termoelektrickou úpravou vzduchu se tato hodnota pohybovala v rozmezí 0,46 až 1,1, viz graf na obrázku 3 níže.



Obr. 3; Průběh topného faktoru fasádního modulu s termoelektrickou úpravou vzduchu v průběhu roku [17]

Jiné studie uvádí hodnotu topného faktoru v rozmezí 0,38-2 v závislosti na uvažovaných podmínkách provozu. Jako optimální hodnotu topného faktoru termoelektrického článku uvádí [18] 0,82. Z uvedených hodnot topných faktorů a z průběhu na obrázku 3 výše je patrné, že hodnoty topného faktoru jednoznačně hovoří v prospěch konvenční jednotky, neboť její účinnost je výrazně vyšší než v případě úpravy vzduchu termoelektrickými články. Na druhou stranu tyto články nabízí kompaktní a robustní řešení. Hlavní výhodou systému je jeho životnost a minimální servisní požadavky při jeho provozu. Z toho důvodu je takový systém vhodný k integraci do zateplovacích systémů. Podstatnou roli hraje také již zmiňovaná možnost použití fotovoltaických panelů k napájení fasádního modulu, která do jisté míry může kompenzovat horší účinnost tím, že provoz může být vázán na produkci z lokální fotovoltaiky jakožto bezemisního zdroje.

S odlišným konceptem fasádního modulu využívajícího termoelektrické úpravy vzduchu přišel kolektiv autorů Zavřel, Matuška a Zmrhal z Českého vysokého učení technického v Praze. [19] Jejich návrh narozdíl od modulu, který zkoumala Ibáñez-Puy, není zamýšlen pro provoz u dvojitéch fasád, nýbrž jako samostatná fasádní vzduchotechnická jednotka integrovaná do vnější obálky budovy. Provozem

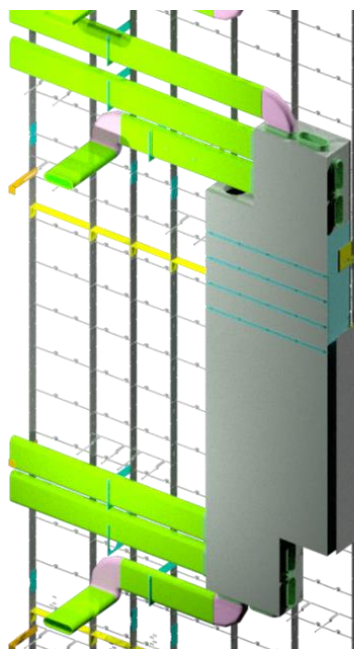
této jednotky je tedy ovlivněna jak hygienická kvalita vnitřního vzduchu (jedná se o nucené větrání vnitřního prostoru), tak pomocí vložených termočlánků jeho teplota. Chování jednotky bylo nejprve zkoumáno na experimentální trati. Jejich výzkum se také zabýval simulačními modely pro prostředí TRNSYS pro podporu vývoje fasádních vzduchotechnických zařízení s termoelektrickou úpravou vzduchu. [19] V současné době je tento výzkumný tým součástí širšího konsorcia v rámci evropského projektu PLURAL. Jedním z cílů tohoto projektu je vývoj modulární fasádní vzduchotechnické jednotky s termoelektrickou úpravou vzduchu. Více informací o projektu je možné nalézt v [20] a [21].

5. Popis studovaného fasádního systému a modelová situace

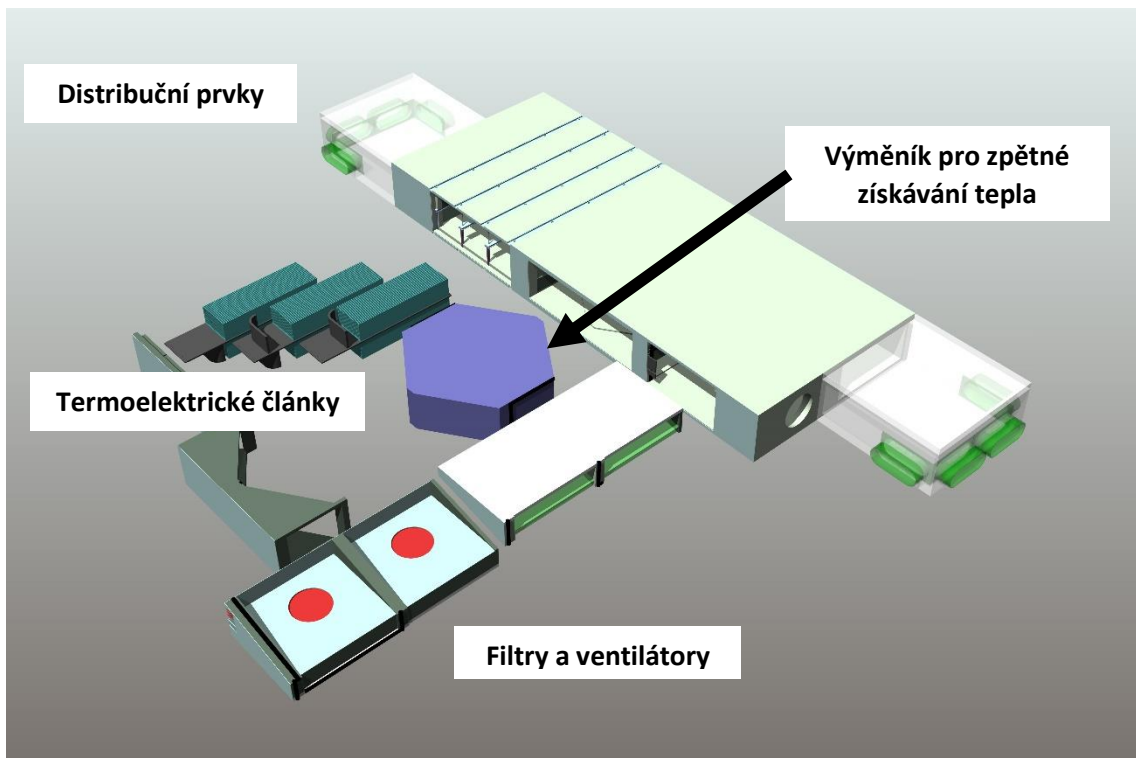
Tato diplomová práce se inspiroje a volně navazuje na simulační studii Ing. Vojtěcha Zavřela, PhD. prezentovanou na mezinárodní konferenci CLIMA [22], která vznikla v rámci zmiňovaného projektu PLURAL. Cílem této diplomové práce je vyhodnotit výkonnost fasádního modulu s integrovanými energetickými systémy pro různé scénáře. V této části práce je popsána modelová situace, popis simulačních nástrojů a sledované metriky.

4.1 Studovaný fasádní systém

Koncept studovaného fasádního systému [19], jehož možnost použití je stále předmětem výzkumu, je zobrazen na obrázcích 4 níže a 5 na další straně. Obrázky byly pro ilustrační účely poskytnuty mým vedoucím, doktorem Zavřelem. Na obrázku 5 níže je nastíněno možné uložení fasádního modulu do vnější obálky budovy. Z důvodu integrace modulu do vnější obálky budovy a prostorového omezení je třeba minimalizovat rozměry všech použitých prvků – od komponent jednotky po distribuční prvky systému.



Obr. 4; Koncepte vzduchotechnického fasádního modulu s termoelektrickou úpravou vzduchu



Obr. 5; Komponenty studovaného vzduchotechnického fasádního modulu

Studovaný fasádní modul (zobrazený na obrázku 5 výše) je na přívodní straně osazen filtry a ventilátory sloužícím k přívodu vzduchu do vnitřního prostoru a k odvedení znehodnoceného vzduchu. Tyto komponenty lze volit dle potřeb konkrétní aplikace a požadavků na čistotu přiváděného vzduchu. Ten je veden skrze výměník tepla (systém zpětného získávání tepla) k termoelektrickým článkům. Ty slouží k jeho „aktivní“ úpravě, tj. k ohřevu či ochlazení dle požadavku na teplotu přiváděného vzduchu. Upravený vzduch je poté distribučními prvky přiveden do vnitřního prostoru. Fasádní modul v sobě tedy kombinuje přívod a tepelnou úpravu vzduchu přiváděného do vnitřního prostředí. Lze jej rozšířit i o integrovaný fasádní fotovoltaický panel a tepelnou izolaci. Díky tomu nabízí koncept fasádního modulu komplexní řešení při renovaci budov.

4.2 Popis modelové situace

Pro účely výzkumu je chování fasádního modulu zkoumáno simulačně. Pro jeho použití byl vytvořen model referenční rezidenční budovy, jíž je bytový dům ve španělském městě Barcelona, který je zobrazen na obrázku 6 níže a byl pro ilustrační účely poskytnut mým vedoucím. V této studii je vyhodnocen stav v rámci jedné bytové jednotky, u které se uvažuje obsazenost třemi osobami. Předlohou pro simulaci byla vybrána bytová jednotka o ploše 43 m² v prvním poschodí budovy. Její dispozice je shodná pro orientaci do vnitrobloku i směrem do ulice. Pro zohlednění vlivu okolní zástavby je simulace provedena pro oba případy orientace fasády budovy. Geometrie bytové jednotky je zachována v modelu vytvořeném v prostředí nástroje IDA ICE i TRNSYS tak, aby bylo možné výsledky přípravné simulace v IDA ICE použít pro pokračování studie v prostředí TRNSYS.



Obr. 6; Studovaná rezidenční budova

4.3 Použité simulační nástroje

4.3.1 Prostředí IDA ICE

Simulační nástroj IDA ICE se používá k modelování vícezónových budov, systémů sloužících k jejich provozu a jejich regulaci. IDA ICE je kontinuálně vyvíjena od roku 1998 švédskou společností EQUA [23]. Díky stálému vývoji jsou v simulacích zohledněny nové poznatky z výzkumu a výsledky simulací odpovídají výsledkům měření již stávajících objektů. Výstupem simulací je jednak energetická bilance objektu (se zohledněním vnitřních zisků od uživatelů a uvažovaného vybavení spotřebiči, technického zařízení budovy, solárních zisků, vliv tepelných mostů), tak kvalita vnitřního prostředí (koncentrace CO₂, hodnoty PPD a PMV, hodiny diskomfortu).

Počasí a vliv klimatu je v IDA ICE zohledněn datovým souborem z databáze Ashrae nebo EnergyPlus. Tato hodinová data reflektují tzv. typický rok, který odpovídá dlouhodobému průměru dané lokace. Z tohoto důvodu se nehodí pro simulaci extrémních podmínek, které mohou v dané lokaci výjimečně nastat. Poskytují však dobrou předpověď chování budovy pro běžné podmínky. Data lze získat jednak z výše uvedených internetových databází, nebo lze pro vybrané lokace využít vlastní knihovny programu IDA ICE.

4.3.2 Prostředí TRNSYS

Simulační program TRNSYS, který je komerčně dostupný již 35 let, slouží obecně k simulaci přechodových jevů – především pro simulace termálních či elektrických energetických systémů, lze v něm ale rovněž simulovat biologické procesy, dopravu aj. Výhodou je i možnost integrace programovatelných komponentů, které uživatel může vložit pro potřebu vlastního výzkumu. [24] Jakožto simulační nástroj je jeho použití tedy více univerzální oproti výše uvedenému nástroji IDA ICE, který se soustřeďuje primárně na chování budovy z hlediska energetické náročnosti a komfortu vnitřního prostředí.

4.3.3 Kombinovaný postup při simulaci

Pro simulaci komfortu vnitřního prostředí z hlediska koncentrace CO₂ byl použit program IDA ICE, neboť má integrován výpočet průtoku a kvality vzduchu. Výsledkem simulací byl průtok vzduchu uvnitř bytové jednotky a vývoj koncentrace CO₂. Výsledky simulací v IDA ICE byly použity jako vstupní data pro stávající

simulační model v TRNSYSu. Základní energetický model jednotky a budovy byl k dispozici z předešlého výzkumu. [22] Tento model byl upraven tak, aby vyhovoval zadané parametrické analýze.

4.4 Sledované metriky

K vyhodnocení simulací a porovnání výsledků je sledována jednak energetická náročnost objektu na potřebu vytápění a potřeba primární energie budov z jednotlivých vymezených období, tak komfort vnitřního prostředí. Ten je vyhodnocen počtem hodin diskomfortu a kvalitou vnitřního vzduchu z hlediska koncentrace CO₂ ppm. Vzhledem k využití fotovoltaických panelů jako zdroje obnovitelné energie je sledována také míra využití produkované elektrické energie.

4.4.1 Komfort vnitřního prostředí a kvalita vnitřního vzduchu

Pro představu o míře a o posouzení tepelného komfortu vnitřního prostředí lze použít ukazatele PPD a PMV. Ukazatel PMV vyjadřuje stupeň diskomfortu, který bilancuje tepelné toky mezi prostředím a lidským organismem. Ukazatel PPD pak predikuje procento nespokojených osob vzhledem k vytvořeným podmínkám vnitřního prostředí. [25] Oba tyto ukazatele jsou v práci použity k hodnocení komfortu vnitřního prostředí. Vyhodnocení je provedeno na základě vyjádření počtu hodin diskomfortu, tj. počtem hodin, kdy není požadovaného komfortu ve vnitřním prostředí dosaženo. Vyhodnocení výsledných dat je provedeno pouze pro dobu, kdy je bytová jednotka obsazena uživateli. Výsledky simulací jsou hodnoceny pro kategorii III tepelného stavu prostředí dle EN 16 798-2. Tato kategorie stanovuje jako přijatelné, a tedy komfortní, podmínky vnitřního prostředí v rozmezí hodnot -0,7 až 0,7 PMV a hodnot do 15 % PPD. Pro tuto kategorii jsou výsledky této studie zpracovány.

Mimo výše uvedených ukazatelů o kvalitě vnitřního prostředí je také v simulacích sledován průběh koncentrace CO₂, který vypovídá o kvalitě vnitřního vzduchu a lze jej porovnat s hygienickými limity, které jsou pro obytné prostory vyhláškou č. 268/2009 Sb. (Vyhláška o technických požadavcích na stavby) dle §11 v bodu 5) stanoveny na hodnotu 1500 ppm. Tato hodnota nesmí být v prostoru pobytočných místností v době pobytu osob překročena.

4.4.2 Primární energie

Pro hodnocení energetické náročnosti budovy na potřebu vytápění slouží jako jeden ze tří ukazatelů potřeba primární neobnovitelné energie. Stanovení potřeby primární energie budovy, respektive rozšíření hodnocení energetické náročnosti budov o potřebu neobnovitelné primární energie, bylo dáno vyhláškou č. 78/2013 Sb. (Vyhláška o energetické náročnosti budov), která byla nahrazena a v současné době platí ve znění vyhlášky č. 264/2020 Sb. (Vyhláška o energetické náročnosti budov) k zákonu č. 406/2000 Sb. (Zákon o hospodaření energií). [26]

Z hlediska průkazu energetické náročnosti budov potřeba primární energie zásadně ovlivňuje návrh zdrojů energie pro vytápění, chlazení a další provoz budovy zajišťující strojní zařízení. Vypovídá tedy o provozu budovy a dopadu jejího užívání na životní prostředí, přičemž zohledňuje i energetický mix daného státu, který je daný geografickými podmínkami i politickým směřováním každé země. Právě z těchto důvodů se výsledky mohou velmi zásadně lišit. Pro představu a srovnání jednotlivých lokalit, které byly voleny pro tuto simulační studii chování fasádního modulu, jsou v přílohách č. 3-11 práce grafy zobrazující energetický mix zemí uvažovaných v této studii. [27] [28] [29] Uvažované konverzní faktory primárních energií jsou uvedeny v části 5.2.2. této práce. [30]

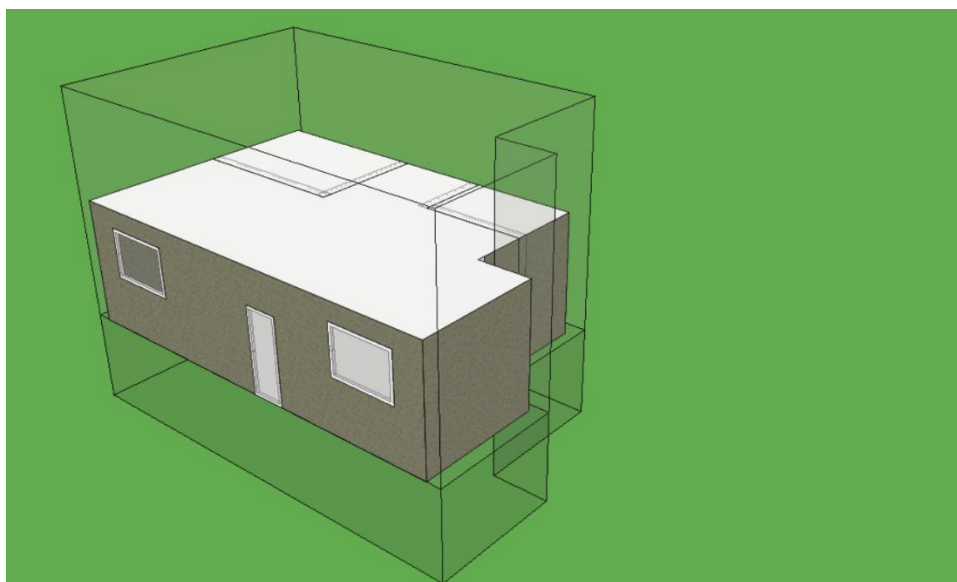
6. Simulační model, scénáře a vstupní předpoklady

Cílem práce je posouzení více-účelového fasádního modulu, jehož použitím je snaha dosáhnout vyšší kvality vnitřního prostředí staveb. K určení vhodnosti použití studovaného fasádního modulu byly zformulovány modelové scénáře, které zohledňují rozdílné situace, ve kterých lze tento inovativní produkt používat. Při jejich formulaci bylo snahou popsat reálné stavy, které při užívání budovy mohou nastat a kvalitu vnitřního prostředí zásadním způsobem ovlivňují. Zformulované scénáře a vstupní předpoklady, které byly při simulacích uvažovány, jsou popsány v této části práce.

5.1. Simulační model

6.1.1. Simulační model kvality vnitřního vzduchu

V prostředí IDA ICE byl model vytvořen samostatně. Jeho podoba je na obrázku 7 níže. Sledovaná bytová jednotka se skládá ze dvou samostatných ložnic, obývacího pokoje spojeného s kuchyní a ze samostatné koupelny. Modelovou budovou je bytový dům, který má v ose společnou chodbu, na jejíž obou stranách jsou tyto bytové jednotky. Orientace vnější fasády je z jedné strany do ulice a z druhé do vnitrobloku, což je v modelu respektováno rozdílným nastavením vlivu větru – viz níže při popisu infiltrace. Uvažovaná obsazenost bytové jednotky je tři osoby. Byt byl rozdělen do tří částí – obytných prostor, kuchyně a koupelny.



Obr. 7; Model bytové jednotky v IDA ICE

K rozdělení obývacího pokoje a kuchyně do dvou samostatných zón bylo přistoupeno kvůli správnému umístění digestoře do prostoru bytu v prostředí simulačního nástroje IDA ICE. Do stěny, která od sebe v nástroji IDA ICE formálně odděluje obě zóny, byl vložen „otvor“ který stěnu vyplňuje, čímž je splněna referenční dispozice bytu – kuchyně spojená s obytnou částí bytové jednotky. Koupelna je oddělena plnou stěnou se standardními vnitřními dveřmi. Použitý krok simulace byl volen 15 minut.

V rámci této simulace bylo potřeba sledovat celkový průtok vnitřním prostorem – se zahrnutím infiltrace netěsnostmi vnějšího pláště budovy a přirozené ventilace, a poté v další části i nuceným odvodem vzduchu v prostoru kuchyně digestoří, v prostoru koupelny byl uvažován provoz odtahového ventilátoru. Infiltrace netěsnostmi je v modelu reprezentována otvorem na vnější fasádě o ploše 628 cm² pro stavy před rekonstrukcí (zástavba z rozmezí let 1950 až 1990 a 1990 až 2010) a plochou 314 cm² pro stav po rekonstrukci (zástavba od roku 2010 do současnosti). Velikost plochy reprezentuje standard stavebního provedení staveb – historicky nižší a jeho vývoj do současnosti, kdy jsou obálky budov značně utěsněny. Pro jeho určení se vycházelo ze zjednodušené představy spáry po obvodu oken – ta byla uvažována 4 mm pro starší zástavbu, 2 mm pak pro stav po rekonstrukci. Tato spára reprezentuje veškeré netěsnosti stavební konstrukce, které nebylo možné zjistit jiným způsobem. Správnost tohoto zjednodušujícího předpokladu byla ověřena porovnáním s doporučenou hodnotou celkové intenzity výměny vzduchu, který stanovuje norma ČSN 73 0540-2 (Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky. Praha: ČNI, 2011). Výsledné intenzity průtoku vzduchu jsou uvedeny v části 6 této práce. Pro vyhodnocení kvality vnitřního vzduchu z hlediska koncentrace CO₂ ppm byla nastavena hodnota venkovního vzduchu 400 ppm, což odpovídá celosvětovému průměrnému stavu koncentrace CO₂ ppm ve vzduchu.

Protože se modelovaná budova nachází v městské zástavbě, byl pro simulaci infiltrace model nastaven odpovídajícím způsobem – jednalo se o nastavení koeficientů tlaku větru, které závisí na tvaru budovy a typu okolní zástavby. Pro jejich nastavení byly použity přednastavené hodnoty v simulačním programu IDA ICE. Pro orientaci vnější fasády do vnitrobloku byl volen přednastavený stav „sheltered“ – tedy krytá budova, pro orientaci do ulice pak přednastavený stav „semi-sheltered“ - tedy částečně krytá fasáda, což respektuje jak městskou zástavbu, tak fakt, že fasáda

orientovaná do ulice je vlivu větru vystavena větší měrou než fasáda orientovaná do vnitrobloku. Z výsledných dat je poté celkový výsledný průtok vnější obálkou přepočítán dle váženého průměru plochy vnější obálky jednotlivých místností na průtok jednotlivými místnostmi. Takto zpracované výsledky byly v práci později použity jako vstupní data pro simulaci v programu TRNSYS.

6.1.2. Simulační model energetické náročnost a tepelného komfortu

Pro simulaci v prostředí TRNSYS byl model poskytnut mým vedoucím, doktorem Zavřelem. Model je zde vícezónový, rozdělen na jednotlivé místnosti všech bytů. Samotný model v prostředí TRNSYS je složen ze samostatných komponentů, které reprezentují jednotlivé prvky (fotovoltaický systém, zásobník teplé vody, studovaný fasádní modul apod.) a z modelu budovy. Jak bylo uvedeno v předchozí části této práce, budova má jednu fasádu orientovanou do ulice, druhá je natočena do vnitrobloku. Pro tyto stavy byla nastavena vstupní data, se kterými simulace v TRNSYS pracovala. Simulační krok byl stejně jako pro simulaci v IDA ICE volen 15 minut v průběhu celého roku. V rámci této práce jsou sledovány pouze dvě bytové jednotky z prvního poschodí – jedna orientovaná do ulice a druhá do vnitrobloku.

5.2. Scénáře dle stavu zástavby

Jak bylo naznačeno v části 2 této práce, technický stav budov jak na území České republiky, tak v celé Evropské unii, je vlivem vysokého podílu starší zástavby značně rozdílný. V této studii je tento fakt zohledněn nastavením modelu budovy, resp. vnější obálky budovy, do tří kategorií, které respektují stavební standardy daného rozmezí let.

První kategorie budov je v práci nazvána jako „starší zástavba“. Tato skupina reprezentuje stavby postavené v rozmezí let 1950–1990. Ještě starší zástavba v této práci není uvažována, neboť renovace těchto budov je z hlediska zlepšení tepelně technických vlastností náročná a pro použití studovaného fasádního modulu jsou tyto stavby nevhodné. V této kategorii není uvažováno s nuceným větráním ani s užitím zkoumaného fasádního modulu. V rámci této studie slouží tato kategorie pouze jako referenční stav.

Druhá kategorie budov je v práci označena jako „běžná zástavba“. V této skupině jsou reprezentovány budovy postavené, či rekonstruované do standardu z rozmezí let 1990–2010. U budov postavených v tomto období je revitalizace vnější

obálky namísto jak z důvodu zlepšení tepelně technických vlastností, tak také vzhledem ke stáří budov – uvažujeme-li životnost objektu přibližně 80 až 100 let, mají před sebou stavby z tohoto období stále většinu své životnosti. Správná revitalizace pak umožňuje dlouhodobě šetrný a ekonomický provoz objektu. Pro tuto kategorii je provedena jednak simulace bez užití fasádního modulu s přirozeným větráním, tak s revitalizací vnější obálky objektu a použitím zkoumaného fasádního modulu s nuceným větráním. Uvažovaný profil otevírání oken je uveden v grafu 5 v části 6.1 této práce. Pro lepší reprezentaci chování uživatelů bytu zůstává tento profil stejný pro stav bez uvažování zkoumaného fasádního modulu, tak při jeho uvažování. Nicméně při použití fasádního modulu je hygienický limit koncentrace CO₂ ppm ve vnitřním prostředí dosažen samotným provozem vzduchotechnické jednotky, která je součástí fasádního modulu. Vliv otevírání oken tedy stav koncentrace CO₂ může z hlediska plnění hygienických limitů pouze zlepšit.

Poslední skupina je v práci označena jako „rekonstruované“. Patří mezi ně stavby postavené nebo rekonstruované se zohledněním nových standardů od roku 2010 do současnosti, tedy zástavba s nejlepšími tepelně technickými vlastnostmi z celé studie. Stejně jako u druhé kategorie budov je i zde provedena simulace jak bez uvažování fasádního modulu, tak s jeho užitím. Větrání bytové jednotky probíhá stejně jako u druhé kategorie budov. Tato kategorie budov je v práci uvažována jako cílený stav – energeticky nejméně náročné zástavby, pro kterou jsou splněny požadavky na komfort vnitřního prostředí.

Pro účely studie a respektování rozdílného stáří zástavby byla obálka studované budovy v modelu upravena do tří kategorií tak, aby svými tepelně technickými vlastnostmi odpovídala typové zástavbě z uvedeného rozmezí let výstavby. Součinitel prostupu tepla vnější stěnou byl nastaven na průměrnou hodnotu z vymezeného rozmezí let výstavby budovy. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5 níže.

Tab. 5; Průměrná hodnota součinitele prostupu tepla vnější obálkou stavby

Období výstavby	1950 - 1990	1990 - 2010	2010 - současnost
Průměrná hodnota součinitele prostupu tepla U [W/m².K] obálkou budovy	1,77	1,05	0,23

K nastavení pro jednotlivá období byla uvažována jednotná vnější betonová konstrukce s omítkou. Mladší zástavba a lepší tepelně technické vlastnosti jsou v modelu zohledněny přidáním vrstvou izolace na stejný betonový skelet. Spolu se změnou vlastností stěn bylo uvažováno také se změnou zasklení. U nejstarší zástavby je v modelu zasklení voleno s hodnotami $U = 5,44 \text{ W/m}^2$ a hodnotou $g = 0,73$. Pro nejmladší zástavbu bylo zvoleno zasklení dvojsklem s hodnotami $U = 2,72 \text{ W/m}^2$ a $g = 0,5$. V obou případech byla velikost rámu, která značí poměr rámu k velikosti okenní výplně, nastavena na hodnotu 0,2.

Rozdělení dle způsobu větrání je v simulaci uvažováno pro názornou ukázkou rozdílu v kvalitě vnitřního prostředí, zejména z hlediska kvality vnitřního vzduchu z pohledu koncentrace CO_2 . Ta v případě přirozeného větrání vlivem zatěsněné obálky budovy v mnoha případech nespĺňuje hygienické požadavky stanovené platnou legislativou – v případě České republiky hygienické požadavky stanovuje §11 vyhlášky č. 268/2009 Sb. (Vyhláška o technických požadavcích na stavby) jako mezní hodnotu koncentrace CO_2 v obytných budovách 1500 ppm.

5.3. Scénáře dle lokace

Protože lze předpokládat, že se vhodnost použití termoelektrického ohřevu a chlazení vzduchu bude lišit na základě zeměpisné polohy objektu, simulace jsou provedeny pro tři vybrané lokace. Ty byly vybrány s ohledem na reprezentaci rozdílných klimatických podmínek, omezené jsou ovšem pouze na regiony Evropy. Zároveň lze předpokládat, že na lokaci objektu bude záviset nejen účinnost samotného fasádního modulu, ale také míra využitelnosti obnovitelných zdrojů energie, což je jeden z indikátorů, na jehož základě je v závěru práce vhodnost použití studovaného fasádního modulu vyhodnocena.

První lokací je španělské město Barcelona, ve kterém se nachází referenční objekt bytového domu. Zároveň tato lokace slouží pro reprezentaci klimatických podmínek jižní Evropy. Druhou vybranou lokací je Praha, která je pro účel této studie považována jako referenční lokace pro oblast střední Evropy. Poslední vybranou lokací je Stockholm, který reprezentuje region severní Evropy.

Dále je změna lokace zohledněna i v samotném vyhodnocování výsledků simulací. Výsledky pro každou zemi byly vyhodnoceny se zohledněním typického

způsobu vytápění a přípravy teplé vody daného státu, což ovlivnilo i výslednou potřebu primární energie vlivem rozdílných konverzních faktorů. Ty se liší jednak uvažovaným typem energonositele, ale liší se i pro konkrétní země vlivem jejich rozdílného energetického mixu. Uvažované hodnoty, které byly použity při vyhodnocování výsledků této práce, jsou uvedeny v tabulce 6 níže.

Tab. 6; Uvažované konverzní faktory [26], [30]

	Energonositel	Praha	Barcelona	Stockholm
Vytápění	Zemní plyn	1	-	-
	Elektrická energie	2,6	2,6	2
	Síť CZT	-	-	0,1
Příprava teplé vody	Zemní plyn	1	-	-
	Elektrická energie	2,6	2,6	2
	Síť CZT	-	-	0,1

Pro Švédsko bylo pro vytápění a přípravu teplé vody uvažováno s napojením na síť centrálního zásobování tepla (CZT), která je v zemi silně rozvinutá. Konverzní faktor byl převzat z hodnot uvedených pro Českou republiku – soustava zásobování tepla s podílem obnovitelných zdrojů energie větším než 80 %. [27] V případě Španělska se vytápění uvažuje elektrokotlem a příprava teplé vody elektricky ohříváním zásobníkem. Tato volba zohledňuje podmínky Španělska, kde jsou potřeby na vytápění vlivem klimatu a zeměpisné polohy v porovnání se zbývajícími dvěma státy této studie malé. V případě České republiky je pro potřebu tepla na vytápění a přípravu teplé vody uvažováno s plynovým kotlem a s plynově ohříváním zásobníkem teplé vody.

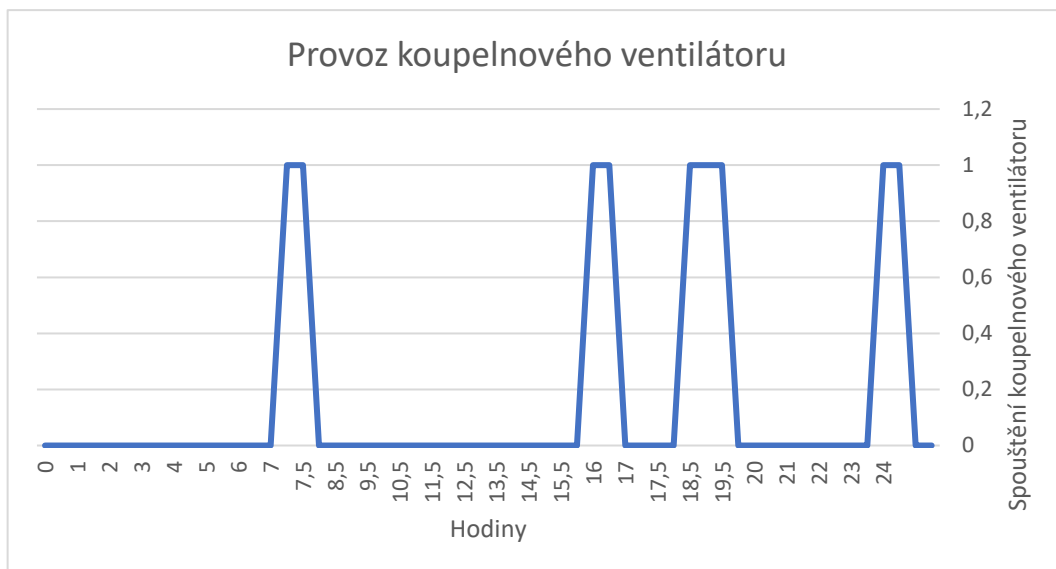
5.4. Scénáře dle vlivu orientace fasády

Stejně jako při zohlednění vlivu lokace budovy lze předpokládat i pro orientaci fasády vůči světovým stranám rozdílné výsledky kvality vnitřního prostředí vlivem rozdílných tepelných zisků a potenciálně tedy i rozdílnou míru vhodnosti pro použití studovaného fasádního modulu. Model v TRNSYS byl proto pro účel simulací dle orientace objektu upraven tak, aby bylo možné otáčení objektu parametrizovat a průběh simulací tak urychlit použitím parametrizace. Díky parametrizaci bylo možné simulaci provést pro všechny čtyři orientace vnější obálky budovy najednou, neboť simulace pro každou orientaci probíhaly ve stejný čas paralelně. Otáčení je řešeno skrze vložení parametru definující velikost otočení – v případě této studie je krok volen 90° . Samotná parametrizace je provedena násobením kroku otočení. Pro jednotlivé kroky simulace pracuje s daty pro infiltraci vnější obálkou budovy pro danou orientaci budovy. Natáčení budovy je pak dosaženo definováním přepočtení úhlu solárního azimutu o velikost otočení. Výsledek této operace je pak vstupní hodnotou pro průběh simulace. Tento postup je doporučen i v uživatelském manuálu k simulačnímu nástroji TRNSYS. [31]

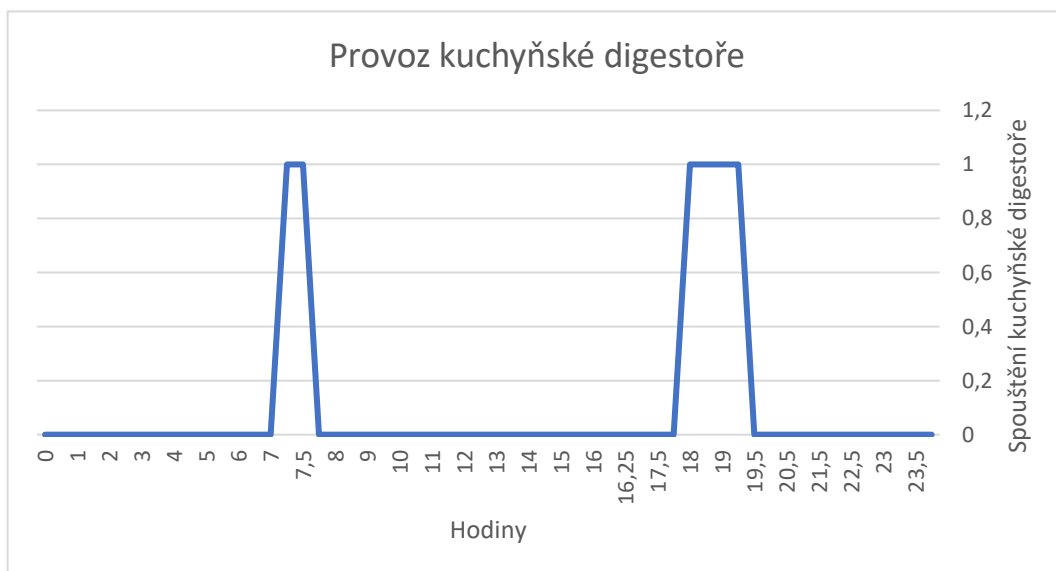
5.5. Scénáře dle užívání objektu

Jakmile se předmětem výzkumu stává vnitřní prostředí a jeho kvalita, nelze v simulaci opomenout styl užívání budovy, který má na její chování zcela zásadní vliv. Způsob užívání se odvíjí od provozu budovy, tj. kdy je užívána, a velmi zásadním způsobem ovlivní nejen tepelnou pohodu, ale také kvalitu vnitřního vzduchu. Od stylu užívání se také odvíjí řízení a regulace technických zařízení budov, tj. přípustný rozsah teplot, při kterých lze objekt užívat, je-li možné budovu mimo provoz temperovat a podobně. Odvíjí se od něho rovněž potřeba zajištění přívodu čerstvého vzduchu, kterou lze řešit buď přirozeným způsobem (je-li možné otevírat okna), nebo nuceně, tj. vzduchotechnickým systémem. Na stylu užívání objektu závisí rovněž vnitřní tepelné zisky, které v sobě zahrnují zisky od osob i od spotřebičů. Tato práce je zaměřena pouze na rezidenční budovy. K tomuto výběru bylo přistoupeno se zřetelem k používání a dispozici modelované budovy a také s ohledem na časové možnosti, které by pro provedení všech simulačních možností (např. při uvažování administrativních budov) a jejich vyhodnocení bylo třeba.

Pro provoz digestoře a koupelnového ventilátoru jsou uvažovány následující denní profily používání viz grafy 2 níže a graf 3 níže.

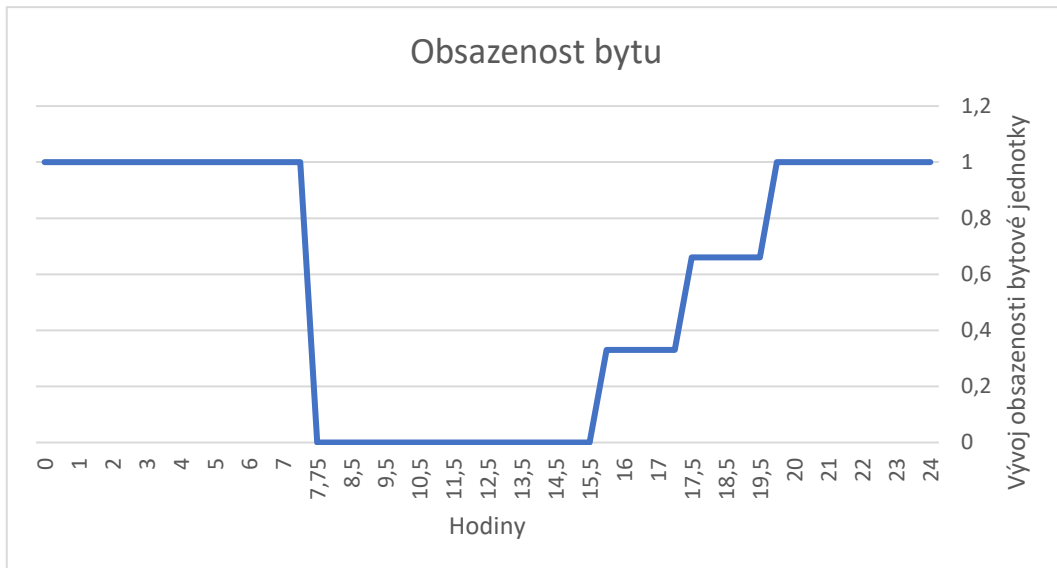


Graf 2; Uvažovaný provoz koupelnového ventilátoru



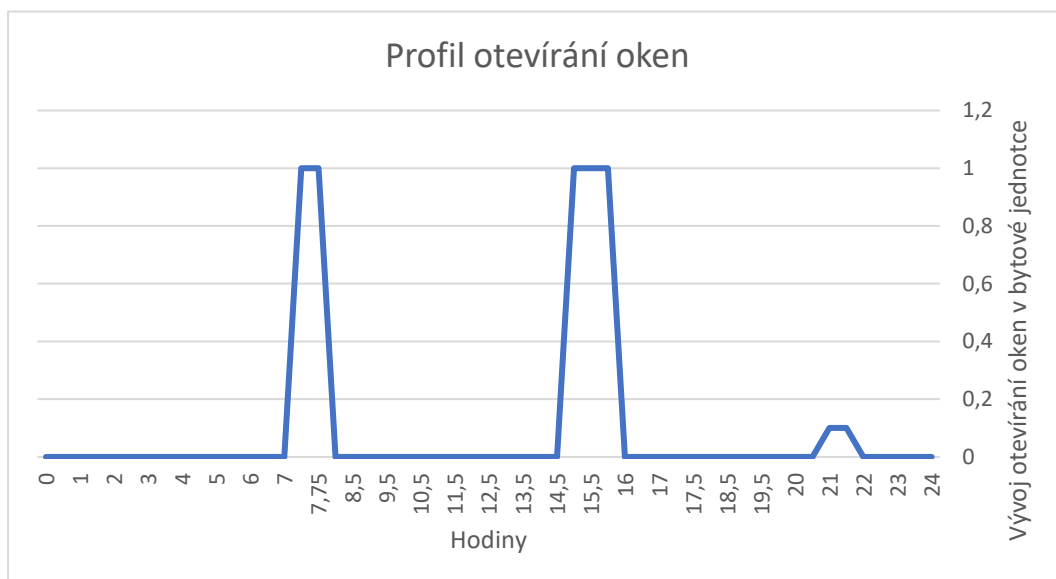
Graf 3; Uvažovaný provoz kuchyňské digestoře

Pro sledování vývoje koncentrace CO₂ ppm je předpokládáný vývoj obsazenosti bytu dle profilu zobrazeného v grafu 4 níže. Vzhledem k dispozici bytové jednotky bylo uvažováno s obsazeností třemi osobami (2 dospělé osoby a 1 dítě), což bylo snahou reprezentovat právě v průběhu obsazenosti bytu.



Graf 4; Modelový průběh obsazenosti bytové jednotky

Zároveň je v simulacích zohledněno otevírání oken uživateli. Uvažovaný profil otevírání oken je zobrazen na grafu 5 níže.



Graf 5; Uvažovaný profil otevírání oken

Provoz studovaného fasádního modulu je zde řízen potřebou průtoku vzduchu k dosažení požadavku koncentrace CO₂ ppm, která je v simulaci nastavena na hodnotu 1 500 ppm, což je v souladu s platnou legislativou v České republice (stanovuje ji vyhláška č. 268/2009 Sb. Vyhláška o technických požadavcích na stavby). Průtok vzduchu jednotkou je zajištěn dvojicí ventilátorů o příkonu 180 W. Maximální průtok vzduchu fasádním modulem je 200 m³/h. Režim ohřevu a chlazení vzduchu je řízen požadavkem vnitřní teploty, která má být udržována v rozmezí 20 až 26 °C. V průběhu léta, kdy hrozí přehřívání vnitřního prostředí, a ochlazený vzduch, který je do prostoru přiváděn, v množství potřebném ke splnění hygienického limitu koncentrace CO₂ nestačí zároveň k dosažení komfortního rozmezí vnitřních teplot, dojde ke zvýšení průtoku vzduchu na maximální možný. Toto řízení umožňuje zlepšit výsledný tepelný komfort vnitřního prostoru a omezit tak počet hodin diskomfortu uvnitř bytové jednotky.

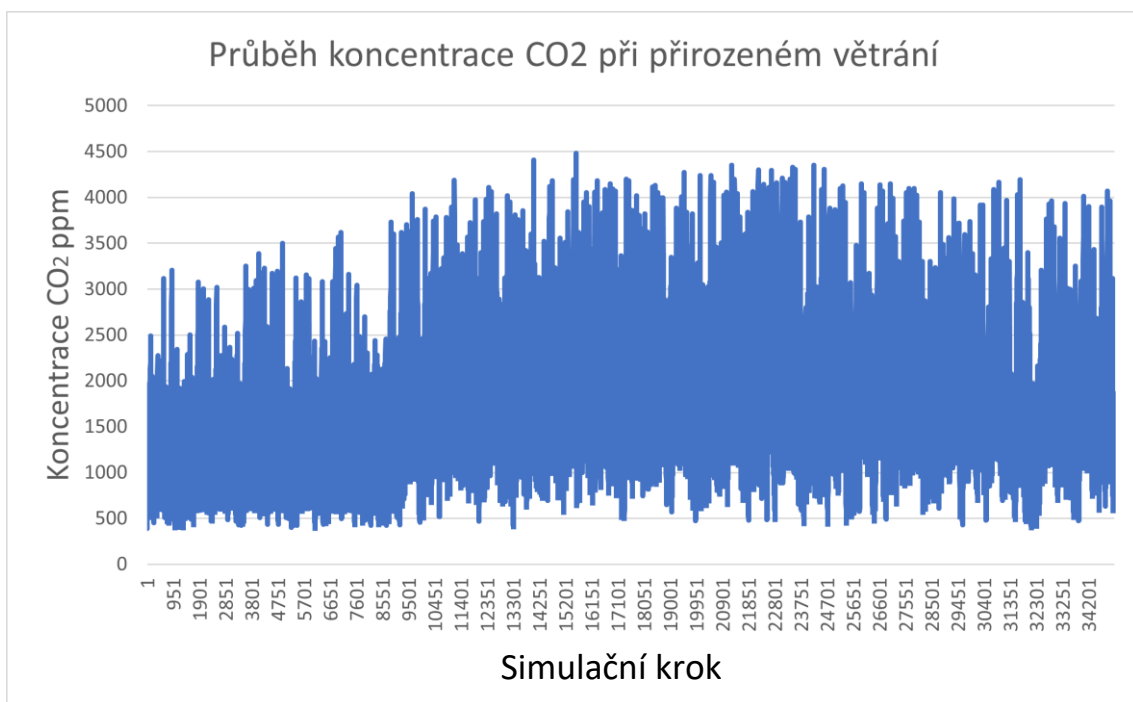
Pro potřebu přípravy teplé vody je v modelu uvažováno se zásobníkem o výkonu 1,5 kW a objemu 80 l. Potřeba vytápění je v modelu reprezentována v jednotlivých zónách (místnostech bytové jednotky) uvažovaným topným výkonem. Pro obývací pokoj je uvažován zdroj tepla o výkonu 3 kW, pro ložnici a dětský pokoj pak zdroje o výkonu 1,2 kW. Zohledněno je rovněž otopné období, které je uvažováno od 1. října do 31. května. V tomto období je v provozu zdroj tepla, který je řízen požadavkem na udržení vnitřní teploty v zóně v rozmezí 20–26 °C. Mimo otopné období je zdroj tepla vypnutý a do průběhu simulace nevstupuje. V simulacích je také zohledněno vybavení bytu běžnými elektrickými spotřebiči a osvětlením. Maximální elektrický příkon uvažovaných spotřebičů je 0,9 kW, pro osvětlení je uvažováno s maximálním příkonem 0,165 kW pro celou bytovou jednotku.

Protože se simulace zabývá také komfortem vnitřního prostředí, je třeba vhodně reprezentovat aktivitu a míru oblečení uživatelů. V simulaci je tento faktor reprezentován hodnotou MET, která reprezentuje fyzickou aktivitu osob. Pro účely simulace je uvažována hodnota 1,2, což odpovídá kancelářské činnosti – člověk pracující vsedě. U míry oblečení osob je snaha reflektovat její změnu v průběhu roku letním a zimním oděvem, který je uvažovaný po dobu otopného období.

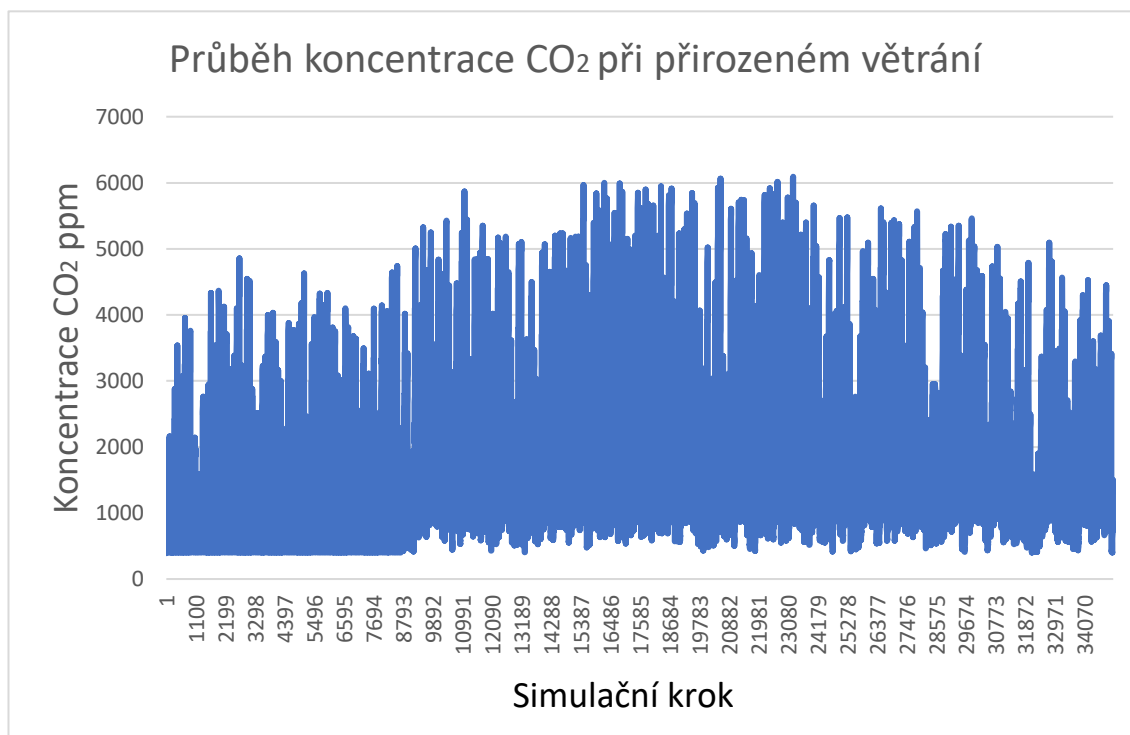
7. Výsledky simulací

7.1. Simulace proudění a kvality vzduchu ve vnitřním prostředí

Celková intenzita výměny vzduchu ve sledovaném prostoru vyšla pro stav při uvažování vlivu infiltrace a přirozeného větrání objektu pro nejstarší uvažovanou zástavbu (období 1950-1990 a 1990-2010) 3,25 [1/h]. Pro nejmodernější uvažovanou zástavbu (od roku 2010 do současnosti) byla intenzita výměny vzduchu infiltrací a přirozeným větráním 1,15 [1/h]. Výsledky byly porovnány s hodnotami, které uvádí norma ČSN 73 0540-2 (Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky. Praha: ČNI, 2011), který pro stavby s přirozeným větráním požaduje hodnotu $n_{50,N}$ 4,5 [1/h] a 1,5 [1/h] pro stavby s nuceným větráním. Výsledek simulací lze proto považovat za věrohodný. Výsledky simulací kvality vnitřního vzduchu, koncentrace CO₂ ppm, z nástroje IDA ICE jsou na grafu 6 níže a na grafu 7 na další straně. Simulace byla provedena pro stav s uvažováním přirozeného větrání pro nejstarší a pro nejmodernější zástavbu a pro stav, kdy je uvažováno nucené větrání vzduchotechnickou jednotkou. Data o průtoku vzduchu byla použita jako vstupní data pro další simulace v nástroji TRNSYS.

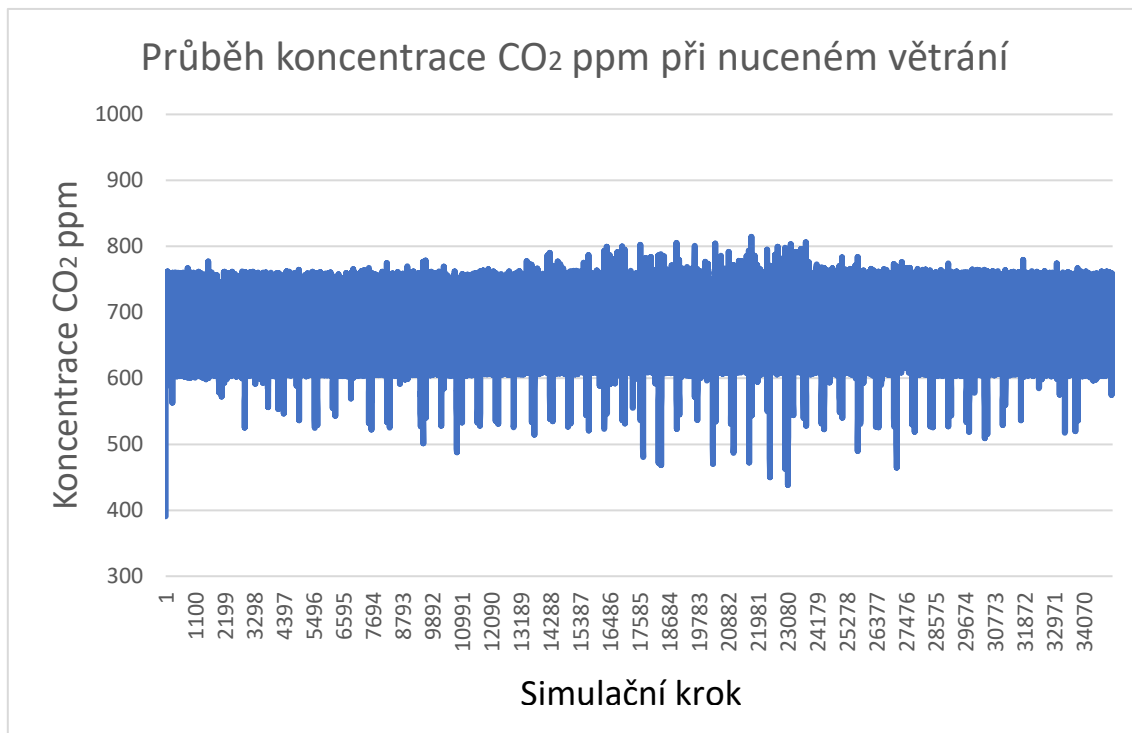


Graf 6; Průběh koncentrace CO₂ při přirozeném větrání, nejstarší zástavba



Graf 7; Průběh koncentrace CO₂ při přirozeném větrání, nejmodernější zástavba

V průběhu celého roku vyšla nadlimitní koncentrace CO₂ ppm pro nejstarší zástavbu 4985 hodin. Pro nejmodernější zástavbu, jejíž průběh je uveden v grafu 7, vyšel nadlimitní průběh koncentrace CO₂ po dobu 4652 hodin – tedy zhruba polovinu roku. Průběh koncentrace CO₂ ppm při nuceném způsobu větrání je zobrazen na grafu 8 na další straně. Nucené větrání je řízeno maximální povolenou koncentrací CO₂ vnitřního vzduchu 1500 ppm, přičemž k nadlimitní koncentraci CO₂ v průběhu celého roku nedojde.



Graf 8; Průběh koncentrace CO₂ při nuceném větrání

7.2. Simulace energetické náročnosti a tepelného komfortu

Výsledky simulací simulačního nástroje TRNSYS jsou zpracovány pro každou lokaci zvláště pro orientaci bytové jednotky do vnitrobloku a pro orientaci do ulice. Tím je zohledněn vliv zastínění okolní zástavbou v případě orientace do vnitrobloku a zároveň vliv rozdílné infiltrace objektu. Zpracované výsledky jsou prezentovány formou grafů, kde jsou ve vzájemné závislosti zobrazeny hodiny diskomfortu a celkové spotřeby primární energie. Pro lepší přehlednost jsou výsledky pro každý stav taktéž vyneseny v tabulce, kde je rovněž rozlišen celkový počet hodin diskomfortu a počet hodin, kdy dochází k přehřívání vnitřního prostoru.

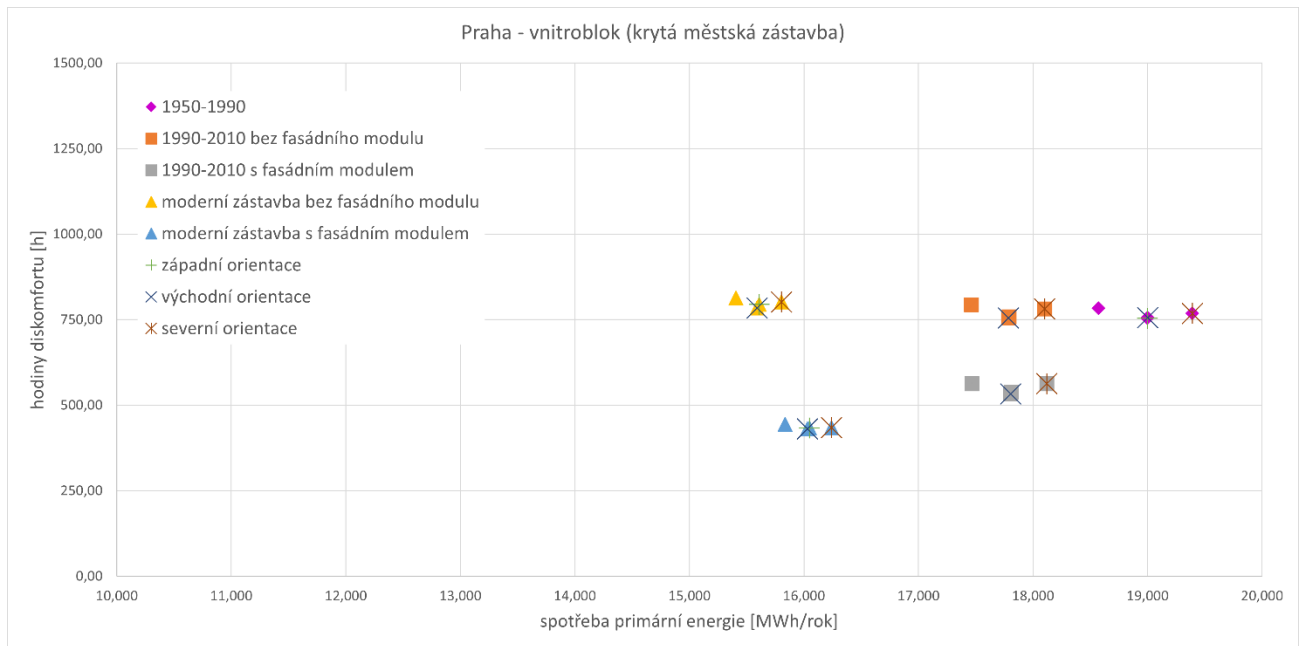
V grafech č. 9 a 10 na straně 42 jsou zobrazena výsledná data pro Prahu. Jsou zde uvedeny všechny simulované stavy, které jsou v práci předmětem studie. Hodiny diskomfortu v grafech jsou celkovým počtem hodin, kdy není dosaženo komfortu vnitřního prostředí – jak z hlediska přehřívání, tak z hlediska nedotápění vnitřního prostoru. Výsledky simulací jsou uvedeny v tabulkách 7 a 8 na následujících dvou stranách. Primární energie je uvedena po přepočtu konverzním faktorem, který je pro tuto lokalitu uvažován 1 – zemní plyn.

Tab. 7: Výsledky simulací pro Prahu - orientace do vnitrobloku

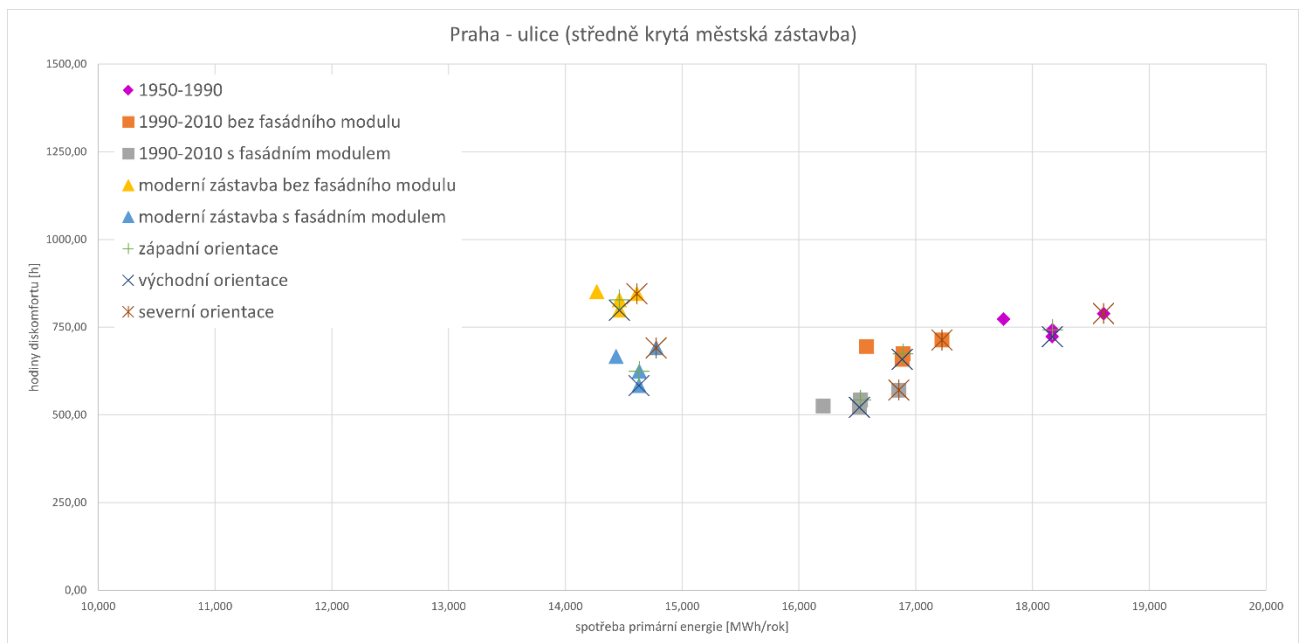
Praha - vnitroblok				
Typ výstavby	Orientace	Primární energie [MWh/rok]	Hodiny diskomfortu [h]	Hodiny přehřívání [h]
1950-1990	Z	18,99	754,00	337,25
	S	19,39	768,25	328,75
	V	19,00	756,75	341,25
	J	18,57	783,50	345,75
1990-2010 bez fasádního modulu	Z	17,79	758,75	393,00
	S	18,10	781,50	380,75
	V	17,79	756,00	394,75
	J	17,46	794,50	234,25
1990-2010 s fasádním modulem	Z	17,81	538,25	164,25
	S	18,12	563,25	130,50
	V	17,80	533,50	164,50
	J	17,47	563,25	142,00
2010 – současnost bez fasádního modulu	Z	15,61	795,50	538,75
	S	15,80	801,25	373,25
	V	15,59	785,25	536,25
	J	15,41	813,50	307,75
2010 – současnost s fasádním modulem	Z	16,05	433,50	182,75
	S	16,24	434,50	155,50
	V	16,03	430,25	180,75
	J	15,84	443,75	167,50

Tab. 8; Výsledky simulací pro Prahu - orientace do ulice

Praha - ulice				
Typ výstavby	Orientace	Primární energie [MWh/rok]	Hodiny diskomfortu [h]	Hodiny přehřívání [h]
1950-1990	Z	18,17	742,50	447,00
	S	18,61	789,00	269,00
	V	18,17	723,00	310,00
	J	17,75	773,00	359,00
1990-2010 bez fasádního modulu	Z	16,89	673,50	274,50
	S	17,23	713,25	234,25
	V	16,88	658,00	271,00
	J	16,58	695,75	298,50
1990-2010 s fasádním modulem	Z	16,53	542,25	218,25
	S	16,86	570,75	165,75
	V	16,52	522,00	209,25
	J	16,21	524,75	228,75
2010 – současnost bez fasádního modulu	Z	14,46	827,75	365,50
	S	14,61	845,50	307,75
	V	14,46	798,75	349,00
	J	14,27	851,00	373,25
2010 – současnost s fasádním modulem	Z	14,63	623,75	288,50
	S	14,78	691,00	234,75
	V	14,63	583,75	279,00
	J	14,43	666,25	299,75



Graf 9; Výsledky simulací pro Prahu při orientaci vnější obálky do vnitrobloku



Graf 10; Výsledky simulací pro Prahu při orientaci vnější obálky do ulice

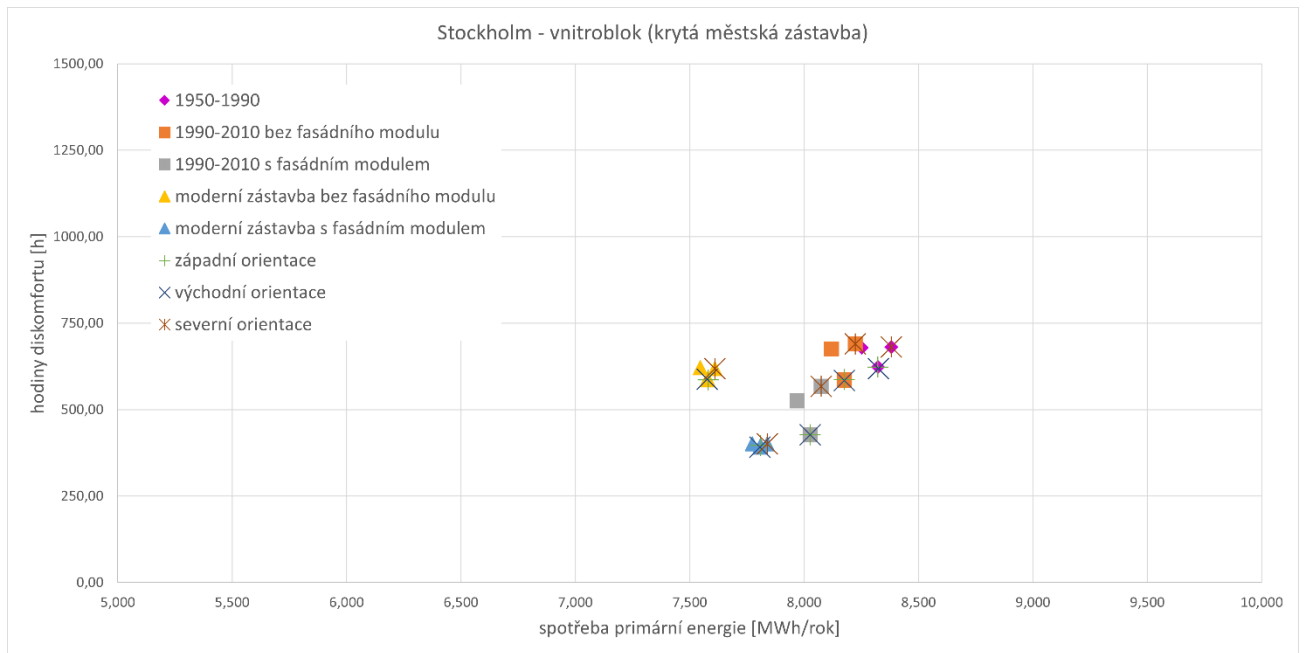
V grafech č. 11 a 12 na straně 45 jsou zobrazena výsledná data pro Stockholm. Hodiny diskomfortu v grafech jsou celkovým počtem hodin, kdy není dosaženo komfortu vnitřního prostředí – jak z hlediska přehřívání, tak z hlediska nedostatečně vytopeného vnitřního prostoru. Výsledky simulací jsou uvedeny v tabulkách 9 a 10 na této a na následující straně. Primární energie je uvedena po přepočtu konverzním faktorem, který je pro Stockholm uvažován 0,1 – síť CZT s vysokým zastoupením OZE v síti CZT.

Tab. 9; Výsledky simulací pro Stockholm- orientace do vnitrobloku

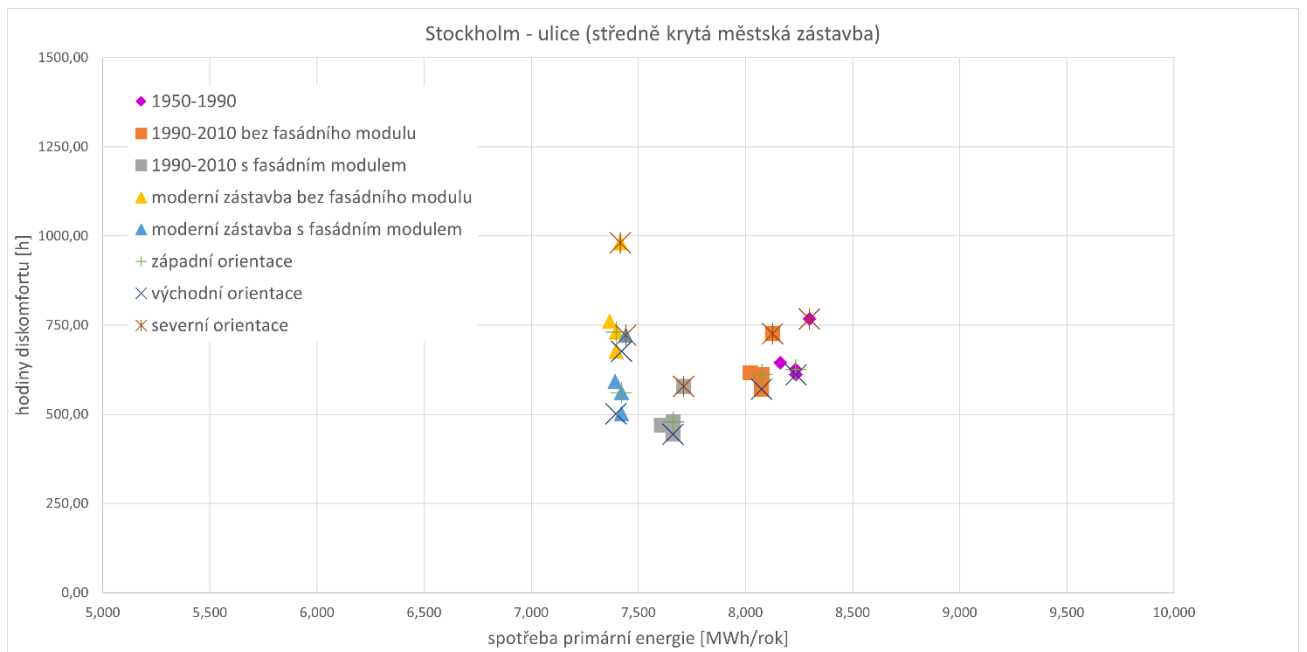
Stockholm - vnitroblok				
Typ výstavby	Orientace	Primární energie [MWh/rok]	Hodiny diskomfortu [h]	Hodiny přehřívání [h]
1950-1990	Z	8,32	623,00	160,00
	S	8,38	680,75	140,75
	V	8,32	618,25	159,00
	J	8,25	678,75	155,00
1990-2010 bez fasádního modulu	Z	8,18	587,00	208,25
	S	8,22	690,00	192,75
	V	8,18	584,25	208,50
	J	8,12	676,25	205,50
1990-2010 s fasádním modulem	Z	8,03	427,75	27,25
	S	8,07	567,75	8,50
	V	8,03	427,25	26,75
	J	7,97	525,50	17,75
2010 – současnost bez fasádního modulu	Z	7,58	586,25	261,25
	S	7,61	619,00	253,50
	V	7,58	587,50	262,50
	J	7,55	621,00	264,25
2010 – současnost s fasádním modulem	Z	7,81	396,25	64,50
	S	7,84	401,25	23,50
	V	7,81	391,00	59,00
	J	7,77	401,25	37,75

Tab. 10; Výsledky simulací pro Stockholm - orientace do ulice

Stockholm - ulice				
Typ výstavby	Orientace	Primární energie [MWh/rok]	Hodiny diskomfortu [h]	Hodiny přehřívání [h]
1950-1990	Z	8,23	625,25	148,75
	S	8,30	767,25	101,50
	V	8,24	611,00	137,50
	J	8,16	644,75	159,50
1990-2010 bez fasádního modulu	Z	8,08	611,50	130,00
	S	8,13	725,75	86,50
	V	8,08	570,25	118,50
	J	8,02	616,50	133,25
1990-2010 s fasádním modulem	Z	8,03	478,50	82,00
	S	7,71	578,25	24,25
	V	7,66	443,75	63,00
	J	7,61	469,50	73,25
2010 – současnost bez fasádního modulu	Z	7,40	730,25	166,25
	S	7,42	980,50	121,00
	V	7,40	676,25	162,00
	J	7,37	760,25	181,25
2010 – současnost s fasádním modulem	Z	7,42	560,50	133,50
	S	7,44	722,00	83,75
	V	7,42	501,25	129,50
	J	7,39	591,75	128,00



Graf 11; Výsledky simulací pro Stockholm při orientaci vnější obálky do vnitrobloku



Graf 12; Výsledky simulací pro Stockholm při orientaci vnější obálky do ulice

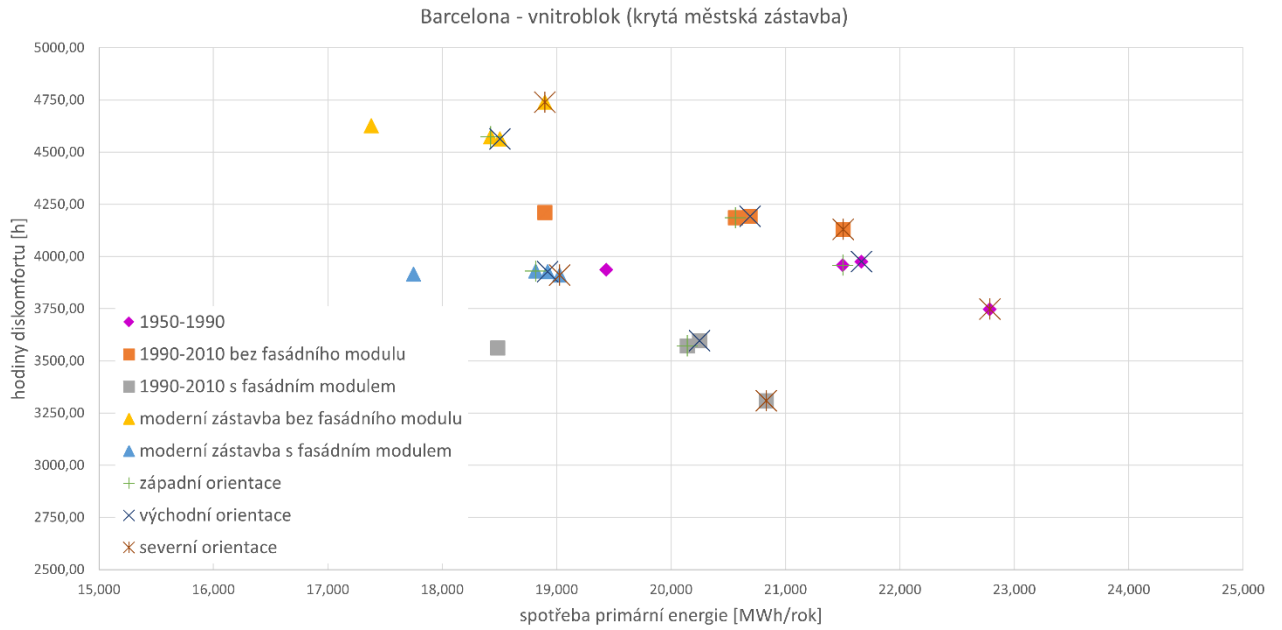
V grafech č. 13 a 14 na straně 48 jsou zobrazena výsledná data pro Barcelonu. Hodiny diskomfortu v grafech jsou celkovým počtem hodin, kdy není dosaženo komfortu vnitřního prostředí – jak z hlediska přehřívání, tak z hlediska nedostatečně vytopeného vnitřního prostoru. Výsledky simulací jsou uvedeny v tabulkách 11 a 12 na této a na následující straně. Primární energie je uvedena po přepočtu konverzním faktorem, který je pro Barcelonu uvažován 2,6 – elektrická energie.

Tab. 11; Výsledky simulací pro Barcelonu - orientace do vnitrobloku

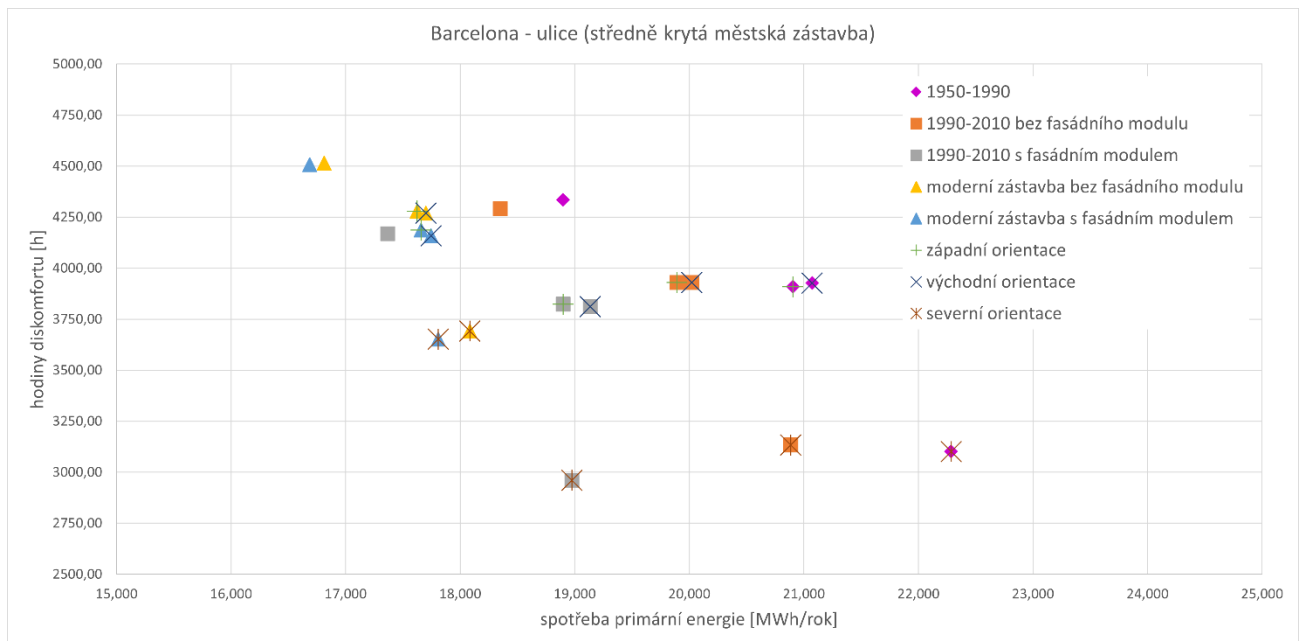
Barcelona - vnitroblok				
Typ výstavby	Orientace	Primární energie [MWh/rok]	Hodiny diskomfortu [h]	Hodiny přehřívání [h]
1950-1990	Z	21,50	3958,25	3958,25
	S	22,79	3747,25	3747,25
	V	21,66	3975,25	3975,25
	J	19,43	3935,75	3935,75
1990-2010 bez fasádního modulu	Z	20,56	4184,75	4184,75
	S	21,50	4129,75	4129,75
	V	20,69	4193,25	4193,25
	J	18,90	4210,75	4210,75
1990-2010 s fasádním modulem	Z	20,14	3571,50	3571,50
	S	20,83	3308,00	3308,00
	V	20,25	3596,50	3596,50
	J	18,48	3561,00	3561,00
2010 – současnost bez fasádního modulu	Z	18,42	4573,00	4573,00
	S	18,90	4739,25	4739,25
	V	18,50	4562,75	4562,75
	J	17,38	4625,75	4625,75
2010 – současnost s fasádním modulem	Z	18,82	3929,75	3929,75
	S	19,03	3911,00	3911,00
	V	18,92	3926,50	3926,50
	J	17,75	3915,00	3915,00

Tab. 12; Výsledky simulací pro Barcelona - orientace do ulice

Barcelona - ulice				
Typ výstavby	Orientace	Primární energie [MWh/rok]	Hodiny diskomfortu [h]	Hodiny přehřívání [h]
1950-1990	Z	20,90	3909,00	3909,00
	S	22,29	3101,50	3101,50
	V	21,07	3927,00	3927,00
	J	18,90	4335,00	4335,00
1990-2010 bez fasádního modulu	Z	19,89	3929,75	3929,75
	S	20,89	3133,75	3133,75
	V	20,02	3929,50	3929,50
	J	18,35	4292,25	4292,25
1990-2010 s fasádním modulem	Z	18,90	3823,50	3823,50
	S	18,98	2961,25	2961,25
	V	19,14	3811,00	3811,00
	J	17,37	4168,50	4168,50
2010 – současnost bez fasádního modulu	Z	17,62	4279,75	4279,75
	S	18,09	3691,25	3691,25
	V	17,70	4270,00	4270,00
	J	16,81	4514,25	4514,25
2010 – současnost s fasádním modulem	Z	17,66	4186,50	4186,50
	S	17,81	3652,00	3652,00
	V	17,75	4158,25	4158,25
	J	16,69	4507,25	4507,25

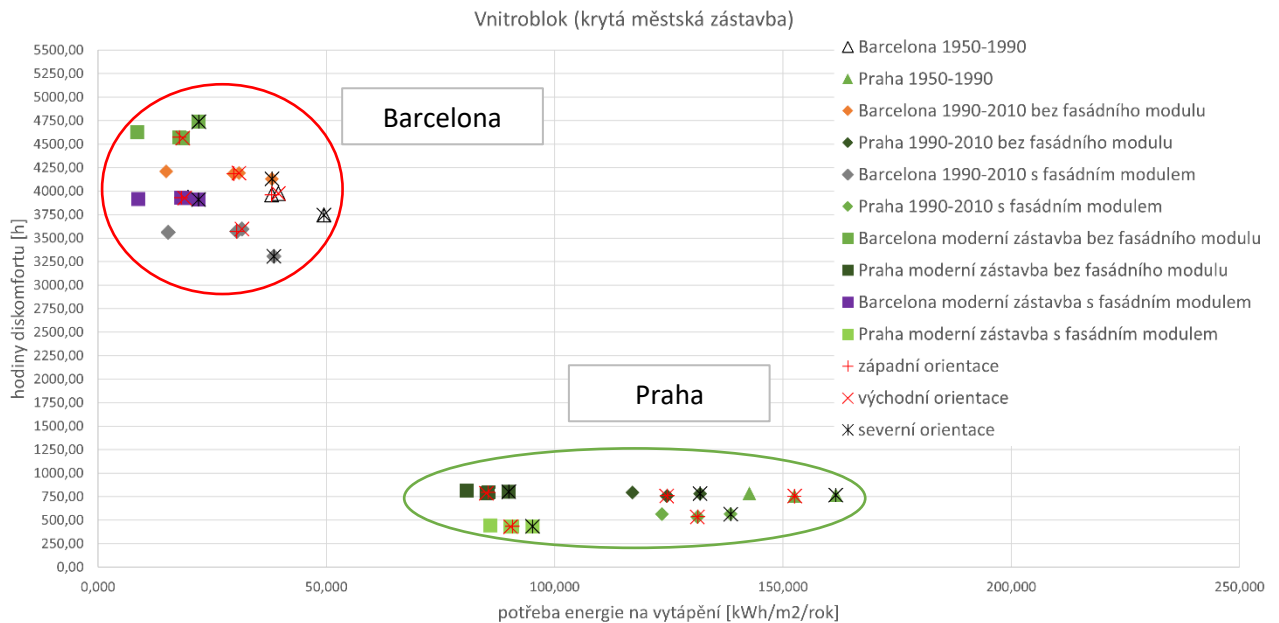


Graf 13; Výsledky simulací pro Barcelonu při orientaci vnější obálky do vnitrobloku

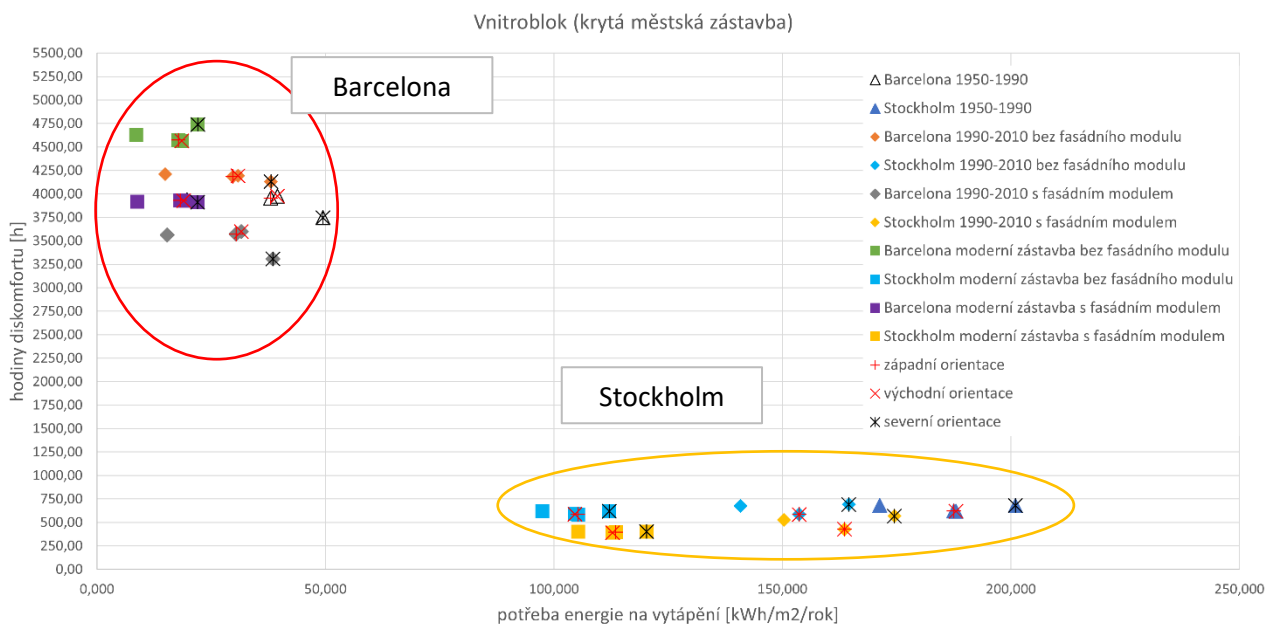


Graf 14; Výsledky simulací pro Barcelonu při orientaci vnější obálky do ulice

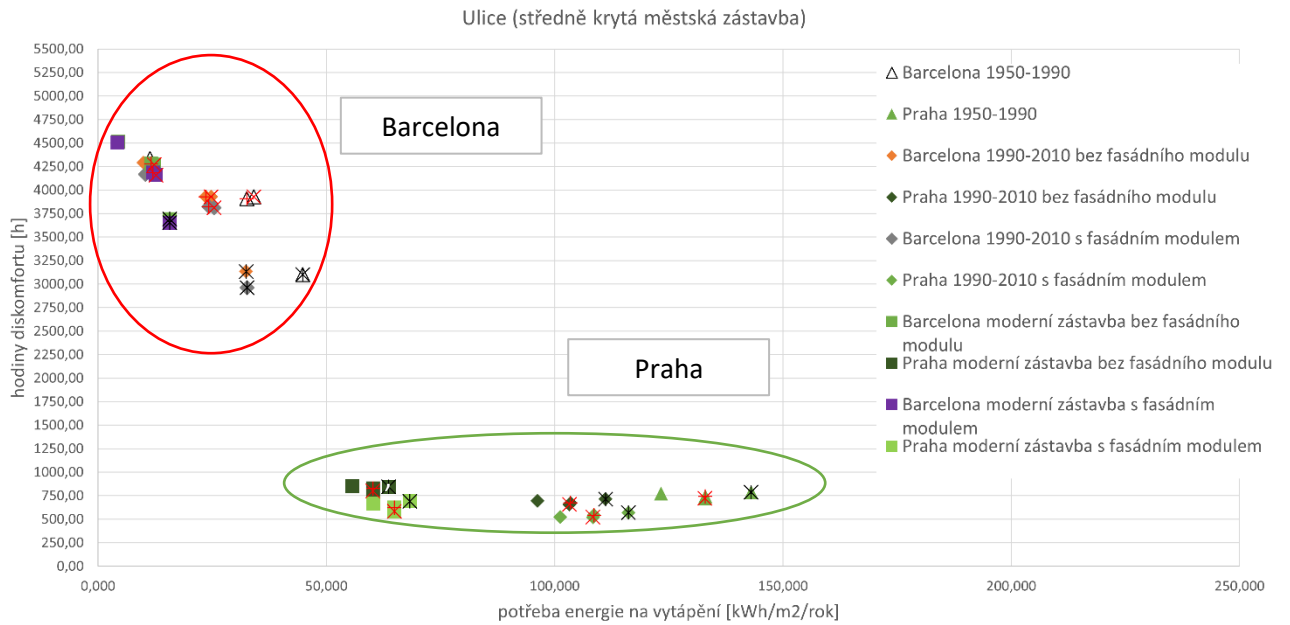
Pro porovnání jednotlivých lokací z hlediska potřeby energie na vytápění v [kWh/m².rok] (bez přepočtu konverzními faktory primárních energií) jsou výsledky prezentovány ještě v následujících dvou grafech (graf 15 a 16) pro orientaci vnější fasády do vnitrobloku. Na grafech 17 a 18 na následující straně jsou výsledky pro orientaci vnější fasády do ulice. Plocha bytové jednotky je 43 m². Rozdělení do více grafů je voleno pro lepší přehlednost – výsledky pro Prahu a Stockholm se vzájemně prolínají a grafy by se staly nepřehlednými.



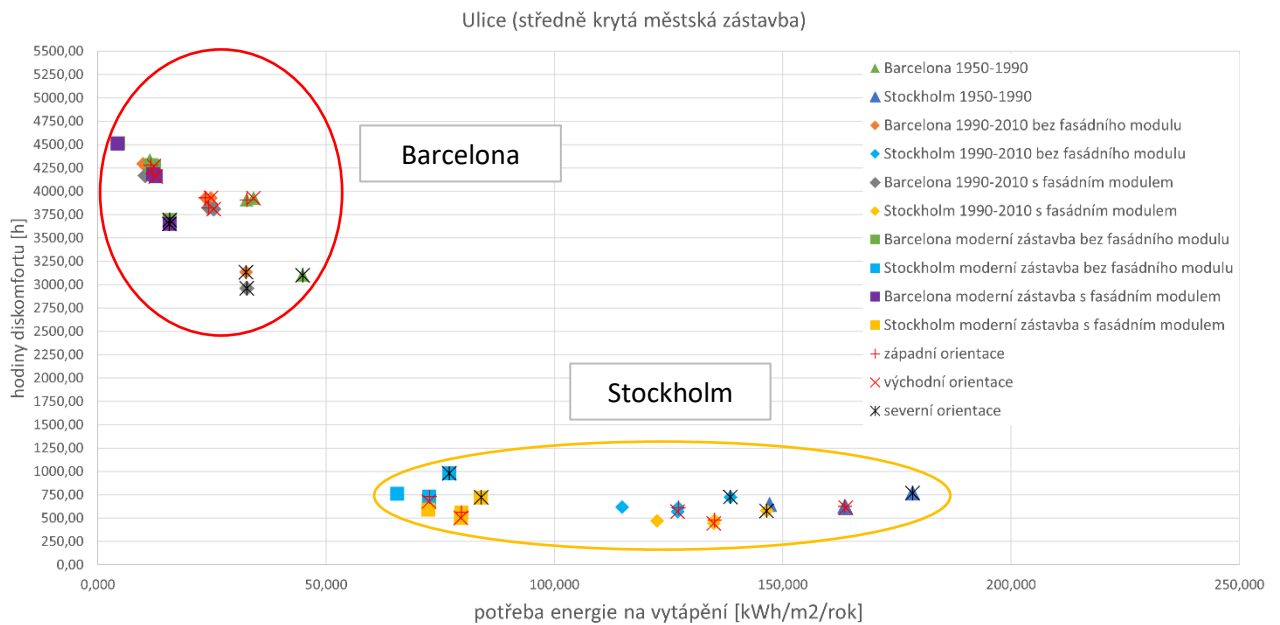
Graf 15; Porovnání potřeby tepla na vytápění pro Barcelonu a Prahu při orientaci do vnitrobloku



Graf 16; Porovnání potřeby tepla na vytápění pro Barcelonu a Stockholm při orientaci do vnitrobloku



Graf 17; Porovnání potřeby tepla na vytápění pro Barcelonu a Prahu při orientaci do ulice



Graf 18; Porovnání potřeby tepla na vytápění pro Barcelonu a Stockholm při orientaci do ulice

8. Diskuse

Simulace kvality vzduchu ve vnitřním prostoru při uvažování pouze infiltrace a přirozeného větrání s pravidelným režimem otevírání a zavírání oken ukázala vysoké riziko nevyhovujících podmínek pro pobytové místnosti ve smyslu koncentrace CO₂. Simulace potvrdila předpoklad zhoršení kvality vnitřního vzduchu vlivem většího zatěsnění vnější obálky v rámci rekonstrukce. Pro splnění hygienického limitu při uvažovaném režimu, je třeba vzduch přivádět nuceně. Režim otevírání a zavírání oken může být velice individuální. Jiný režim, než jak byl stanoven v této studii by vedl k rozdílné výsledné koncentraci. Těžko lze ale předpokládat spolehlivé splnění hygienických podmínek jako v případě použití nuceného větrání. Jeho použití je pro garanci žádaných hygienických limitů tedy klíčové.

Dále jsou diskutovány výsledky energetické náročnosti budov pro uvažované simulační scénáře. Dle očekávání se ve výsledcích simulací projevil vliv rostoucího technického standardu provedení vnější obálky budovy na snížení spotřeby primární energie. Ten byl dán nižšími tepelnými ztrátami objektu. Došlo ovšem k nárůstu přehřívání vnitřního prostoru, který se projevil vyšším počtem hodin tepelného diskomfortu zejména u nejlépe zateplených objektů. Vlivem lepšího zateplení fasády došlo paradoxně i k nárůstu energetické náročnosti, neboť fasádní modul byl provozován delší dobu v režimu chlazení, které je energeticky náročné. Druhým důvodem tohoto nárůstu bylo hrazení vyšší tepelné ztráty větráním uvažovaným zdrojem tepla v místnosti. Přesto simulace potvrdila pro oba typy zástavby, běžnou a nejmodernější, při uvažování provozu studovaného fasádního modulu zlepšení vnitřního komfortu, což se projevilo viditelným snížením počtu hodin diskomfortu.

V simulacích byl také zohledněn vliv orientace fasády do vnitrobloku a do ulice. Při orientaci do vnitrobloku byla vnější fasáda zastíněna okolní zástavbou, čímž byly omezeny solární zisky a počet hodin diskomfortu byl díky tomu nižší oproti orientaci do ulice. I vliv provozu fasádního modulu zde byl díky tomu patrný více. Výsledek odpovídá také vyšší spotřebě primární energie, která byla dána vyšším požadavkem na vytápění objektu – právě vlivem nižších solárních zisků. Ze stejných důvodů byly simulace také provedeny při orientaci vnější fasády vůči všem světovým stranám.

Vliv lokací se projevil jak spotřebou primární energie, tak počtem hodin diskomfortu. Spotřebu primární energie ovlivnily rozdílné tepelné ztráty, které jsou dané rozdílnými klimatickými podmínkami. Druhý faktor, který do spotřeby primární energie vstoupil, byly konverzní faktory energonositelů v jednotlivých státech – na příkladu Stockholmu je patrné, že i přes vysokou potřebu tepla byla spotřeba primární energie relativně nízká, protože lze předpokládat moderní infrastrukturu centrálního zásobování teplem s vysokým podílem OZE, která je pro Švédsko běžná. Oproti tomu výsledky spotřeby primárních energií pro španělské město Barcelona, které má díky příznivému klimatu nejnižší požadavky na vytápění objektu, vyšly s uvažováním vytápění elektrokotlem nejvyšší ze všech studovaných lokací. Simulace však pro všechny lokace potvrdily předpoklad zlepšení vnitřního tepelného komfortu při použití zkoumaného fasádního modulu.

9. Závěr

Cílem práce bylo vyhodnotit vhodnost použití fasádního modulu s termoelektrickou úpravou přiváděného vzduchu pro různé klimatické podmínky v rámci Evropy. Ty byly v simulaci zohledněny výběrem tří lokalit, které jsou reprezentativní pro klimatická pásma jižní, střední a severní Evropy. Protože je fasádní modul určen primárně k renovaci stávajících objektů, byl model vzorové budovy upraven pro tři standardy tepelně technických vlastností vnější obálky stavby reprezentující rozdílné období vzniku budov. Studie byla kromě energetické náročnosti zaměřena také na kvalitu vnitřního prostředí. Nejprve byla studována kvalita vnitřního vzduchu s uvažováním přirozeného, anebo nuceného větrání. Na základě koncentrace CO₂ (ppm) bylo vyhodnoceno plnění hygienických limitů, které stanovuje platná legislativa - v České republice jsou hygienické limity stanoveny §11 vyhlášky č. 268/2009 Sb. (Vyhláška o technických požadavcích na stavby), mezní hodnota koncentrace CO₂ v obytných budovách je 1500 ppm.

Studie samotná byla provedena ve dvou fázích. Nejprve bylo potřeba připravit model vzorové bytové jednotky v simulačním nástroji IDA ICE a provést v něm simulaci průtoku vzduchu bytovou jednotkou a vývoj koncentrace CO₂ ppm. Výsledky této simulace byly v druhé fázi použity jako vstupní data pro již existující model vyvinutý v prostředí TRNSYS z předchozího výzkumu. [22] V nástroji TRNSYS byly zkoumány výkonové parametry fasádního modulu. Obě simulace byly provedeny s časovým krokem 15 minut v průběhu celého roku.

Výsledky parametrické simulace potvrdily, že splnění hygienických podmínek s ohledem na koncentraci CO₂ ppm ve vnitřním prostředí lze garantovat pouze s užitím nuceného větrání. Tohoto výsledku je dosaženo nezávisle na studované lokaci a orientaci vnější fasády či technického standardu jejího provedení. Výsledky dále potvrdily schopnost studované jednotky snížit počet hodin přehřívání vnitřního prostoru. Nejvhodnější klimatické podmínky pro provoz fasádního modulu jsou ve studii reprezentovány lokací Praha. V těchto klimatických podmínkách již poměrně často hrozí přehřívání vnitřního prostředí, nicméně v takové intenzitě, kterou lze zredukovat omezeným výkonem termoelektrického chlazení.

Zateplovací systém s integrovanou fotovoltaikou a řízeným větráním může vést na základě simulovaných scénářů k úsporám potřebného tepla na vytápění až o 20 % oproti referenci z let 1950-1990. Simulace prokázala zvýšené riziko snížení komfortu a kvality vnitřního vzduchu bez uvažování integrované jednotky.

Použitím termoelektrické jednotky lze snížit toto riziko, nicméně výsledky simulací energetické náročnosti studované budovy ukázaly nárůst při použití jednotky v režimu chlazení. Termoelektrické chlazení je energeticky náročné, což se nejvíce projevilo pro klimatické podmínky reprezentované lokací Barcelona. V těchto klimatických podmínkách hrozí přehřívání vnitřního prostoru nejvyšší měrou ze všech studovaných lokací – riziko přehřívání je zde až desetkrát vyšší než v případě klimatu reprezentovaného lokalitou Prahy. Použití fasádního modulu však snížilo riziko přehřívání vnitřního prostoru v případě zástavby nejmodernější (od roku 2010 do současnosti) a běžné (z období let 1990-2010) v Barceloně o 15 %. Ke snížení energetické náročnosti budovy o 8 % při použití studovaného fasádního modulu došlo pro budovy v klimatických podmínkách reprezentovaných lokalitou Stockholm při uvažování běžného standardu (období výstavby 1990-2010) vnější obálky budovy. Při uvažování moderní zástavby (od roku 2010 do současnosti), pro kterou je uvažováno s nejvyšší mírou zateplení, došlo naopak k nárůstu energetické náročnosti oproti stavu bez integrované jednotky pro zástavbu ze stejného časového období zhruba o 3 %. To je dáno vlivem častějšího přehřívání vnitřního prostoru. Fasádní jednotka je kvůli tomu provozována delší dobu v režimu chlazení, který je energeticky náročný. Vliv studované jednotky na snížení energetické náročnosti budovy závisí na provozních podmínkách.

10. Literatura

- [1] *State of the building stock* [online]. Brussels: Buildings Performance Institute Europe, 2017 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: https://www.bpie.eu/wp-content/uploads/2017/12/State-of-the-building-stock-briefing_Dic6.pdf
- [2] *Sčítání 2021: Počet domů* [online]. Praha: Český statistický úřad, c2021 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/scitani2021/pocet-domu>
- [3] *Sčítání 2021: Období výstavby domů* [online]. Praha: Český statistický úřad, c2021 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/scitani2021/obdobi-vystavby-domu>
- [4] TABULA Building typologies - country pages. *Tabula* [online]. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt, c2012-2016 [cit. 2022-05-23]. Dostupné z: <https://episcopo.eu/building-typology/country/>
- [5] Residential buildings - eligibility criteria. *Deutsche wohnen* [online]. Berlín: Deutsche wohnen, 2022 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: https://ir.deutsche-wohnen.com/download/companies/dewohnen/GreenFinance/Eligibility_Criteria_2022.pdf
- [6] *Nová zelená úsporám* [online]. Praha: Státní fond životního prostředí České republiky, c2021 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www.sfzp.cz/dotace-a-pujcky/nova-zelena-usporam/>
- [7] SolarWindow - Clearly Electric. *SolarWindow* [online]. Arizona: SolarWindow, 2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.solarwindow.com/>
- [8] ATTOYE, Daniel Efurosibina a Ahmed HASSAN. A Review on Building Integrated Photovoltaic Façade Customization Potentials. *Sustainability* [online]. 2017, **9**(12) [cit. 2022-05-23]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: doi:10.3390/su9122287

- [9] KUHN, Tilmann E., Christof ERBAN, Martin HEINRICH, Johannes EISENLOHR, Frank ENSSLEN a Dirk Holger NEUHAUS. Review of technological design options for building integrated photovoltaics (BIPV). *Energy and Buildings* [online]. 2021, 15. 1. 2021, (231) [cit. 2022-04-15]. ISSN 0378-7788. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778819339155>
- [10] Unsere Energiewende: sicher, sauber, bezahlbar. *Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz* [online]. Berlín: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2022 [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/energiewende.html>
- [11] FATH, Karoline, Julian STENGEL, Wendelin SPRENGER, Helen Rose WILSON, Frank SCHULTMANN a Tilmann E. KUHN. A method for predicting the economic potential of (building-integrated) photovoltaics in urban areas based on hourly Radiance simulations. *Solar Energy* [online]. 2015, **2015**(116), 357-370 [cit. 2022-04-18]. ISSN 0038-092X. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X15001413>
- [12] BILJECKI, Filip, Hugo LEDOUX a Jantien STOTER. An improved LOD specification for 3D building models. *Computers, Environment and Urban Systems* [online]. 2016, **2016**(59) [cit. 2022-04-21]. ISSN 0198-9715. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0198971516300436>
- [13] LINEYKIN, S. a S. BEN-YAAKOV. SPICE compatible equivalent circuit of the energy conversion processes in thermoelectric modules. *2004 23rd IEEE Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel* [online]. IEEE, 2004, 346-349 [cit. 2022-06-19]. ISBN 0-7803-8427-X. Dostupné z: doi:10.1109/EEEI.2004.1361162
- [14] AKSAMIJA, Ajla, Zlatan AKSAMIJA, Chris COUNIHAN, Dylan BROWN a Meenakshi UPADHYAYA. Experimental Study of Operating Conditions and Integration of Thermoelectric Materials in Facade Systems. *Frontiers in Energy Research* [online]. 2019, **7** [cit. 2022-05-25]. ISSN 2296-598X. Dostupné z: doi:10.3389/fenrg.2019.00006

- [15] Smart Façades: Working from the Outside In to Make Buildings More Energy Efficient. *University of Massachusetts Amherst* [online]. Massachusetts: University of Massachusetts, 2019 [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://www.umass.edu/archivenewsoffice/article/smart-fa%C3%A7ades-working-outside-make>
- [16] IBÁÑEZ-PUY, María, José Antonio SACRISTÁN FERNÁNDEZ, César MARTÍN-GÓMEZ a Marina VIDAURRE-ARBIZU. Development and construction of a thermoelectric active facade module. *Journal of Facade Design and Engineering* [online]. 2015, **3**(1), 15-25 [cit. 2022-05-18]. ISSN 2213302X. Dostupné z: doi:10.3233/FDE-150025
- [17] SALGADO-CONRADO, Lizbeth, César MARTÍN-GÓMEZ, María Ibáñez PUY a José Antonio Sacristán FERNÁNDEZ. Techno-Economic Analysis of a Peltier Heating Unit System Integrated into Ventilated Façade. *HVAC System* [online]. InTech, 2018, 2018-11-14 [cit. 2022-06-13]. ISBN 978-1-78984-432-0. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.76642
- [18] PRIETO, Alejandro, Ulrich KNAACK, Thomas AUER a Tillmann KLEIN. COOLFACADE: State-of-the-art review and evaluation of solar cooling technologies on their potential for façade integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2019, **101**, 395-414 [cit. 2022-06-26]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2018.11.015
- [19] Building Energy Modelling for Development of Active Facade Panel with Solar Generation and Thermoelectric Air-conditioning Unit. *International Building Performance Simulation Association* [online]. 2019 [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2019/BS2019_210416.pdf
- [20] PLURAL. *PLURAL* [online]. Athény: National Technical University of Athens (NTUA), 2020 [cit. 2022-06-20]. Dostupné z: <https://www.plural-renovation.eu/>

- [21] ADAMOVSKEÝ, Daniel, Jan VČELÁK, Pavel MLEJNEK, Jaume COLON, Zuzana PROCHÁZKOVÁ, Constantinos TSOUTIS, Daniel PHILIPPEN a Maria FOUNTI. Technology concepts for rapid renovation using adaptable lightweight façade systems. 2022: *CLIMA 2022 The 14th REHVA HVAC World Congress* [online]. 2022, 2022 [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: <https://proceedings.open.tudelft.nl/clima2022/article/view/42>
- [22] ZAVŘEL, Vojtěch, Petr ZELENSKÝ, Jordi MACIA, Angelos MYLONAS a Jordi PASCUAL. Simulation aided development of a façade-integrated air handling unit with a thermoelectric heat exchanger. 2022: *CLIMA 2022 The 14th REHVA HVAC World Congress* [online]. 2022, 2022 [cit. 2022-06-27]. Dostupné z: <https://proceedings.open.tudelft.nl/clima2022/article/view/207>
- [23] IDA Indoor Climate and Energy. *EQUA* [online]. Stockholm: EQUA, 2022 [cit. 2022-06-11]. Dostupné z: <https://www.equa.se/en/ida-ice>
- [24] TRNSYS. *TRNSYS Transient System Simulation Tool* [online]. Madison, Wisconsin: Thermal Energy System Specialists, 2019 [cit. 2022-06-20]. Dostupné z: <https://www.trnsys.com/index.html>
- [25] DRKAL, František a Vladimír ZMRHAL. *Větrání*. V Praze: České vysoké učení technické, 2013. ISBN 978-80-01-05181-8.
- [26] NOVOTNÝ, Jiří a Tomáš MATUŠKA. Neobnovitelná primární energie. *TZBinfo* [online]. 2017 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/normy-a-pravni-predpisy-vytapeni/16491-neobnovitelna-primarni-energie>
- [27] Czechia: Energy Country Profile. *Our World in Data* [online]. Velká Británie: Our World in Data, 2020 [cit. 2022-05-22]. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/energy/country/czech-republic>
- [28] Spain: Energy Country Profile. *Our World in Data* [online]. Velká Británie: Our World in Data, 2020 [cit. 2022-05-22]. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/energy/country/spain>
- [29] Sweden: Energy Country Profile. *Our World in Data* [online]. Velká Británie: Our World in Data, 2020 [cit. 2022-05-22]. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/energy/country/sweden>

[30] Relevantní podklady a výpočty ke změně faktorů primární energie z neobnovitelných zdrojů energie. *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2020, 1. 4. 2020 [cit. 2022-06-20]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/rozcestnik/ministerstvo/aplikace-zakona-c-106-1999-sb/informace-zverejnovane-podle-paragrafu-5-odstavec-3-zakona/relevantni-podklady-a-vypocty-ke-zmene-faktoru-primarni-energie-z-neobnovitelnych-zdroju-energie--253774/>

[31] *TRNSYS17: Updates in version 17.1* [online]. Madison, Wisconsin: Thermal Energy System Specialists, [2012], s. 16-17 [cit. 2022-06-20]. Dostupné z: https://sel.me.wisc.edu/trnsys/features/t17_1_updates.pdf

11. Seznam legislativy

Vyhláška č. 268/2009 Sb. Vyhláška o technických požadavcích na stavby

Vyhláška č. 78/2013 Sb. Vyhláška o energetické náročnosti budov

Vyhláška č. 264/2020 Sb. Vyhláška o energetické náročnosti budov

Zákon č. 406/2000 Sb. Zákon o hospodaření energií

12. Seznam technických norem

ČSN 73 0540-2. Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky. Praha: ČNI, 2011

EN 16 798 – 2 Energy performance of buildings – Ventilation for buildings

13. Seznam příloh

Příloha 1: Vlastnosti vrstev uvažované ve studii

Příloha 2: Schéma uvažovaného fasádního modulu

Příloha 3: Energetický mix České republiky v rozmezí let 1965-2020

Příloha 4: Energetický mix České republiky v rozmezí let 2005-2020

Příloha 5: Energetický mix Španělska v rozmezí let 1965-2020

Příloha 6: Energetický mix Španělska v rozmezí let 2005-2020

Příloha 7: Energetický mix Švédska v rozmezí let 1965-2020

Příloha 8: Energetický mix Švédska v rozmezí let 2005-2020

Příloha 9: Energetický mix České republiky v roce 2020

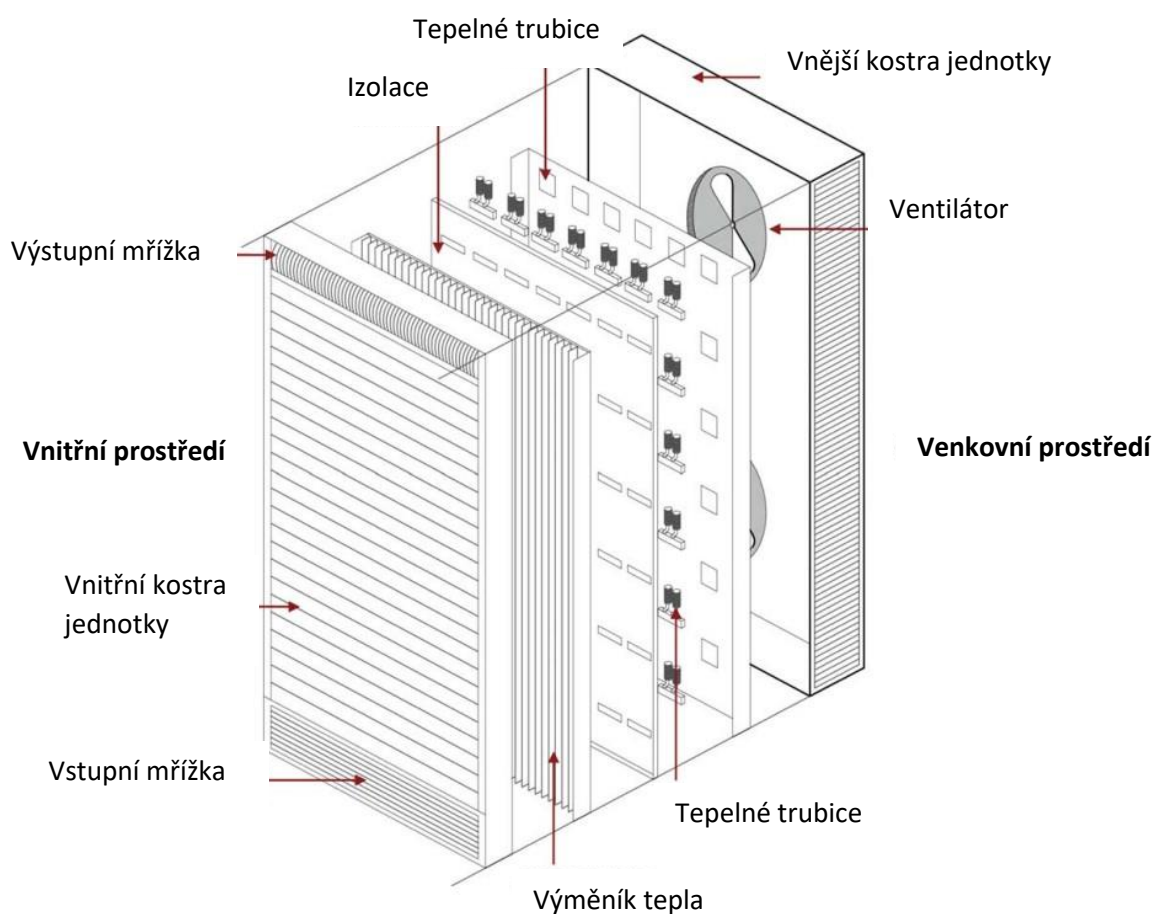
Příloha 10: Energetický mix Španělska v roce 2020

Příloha 11: Energetický mix Švédska v roce 2020

Příloha č. 1 – vlastnosti vrstev uvažované měřící buňky [16]

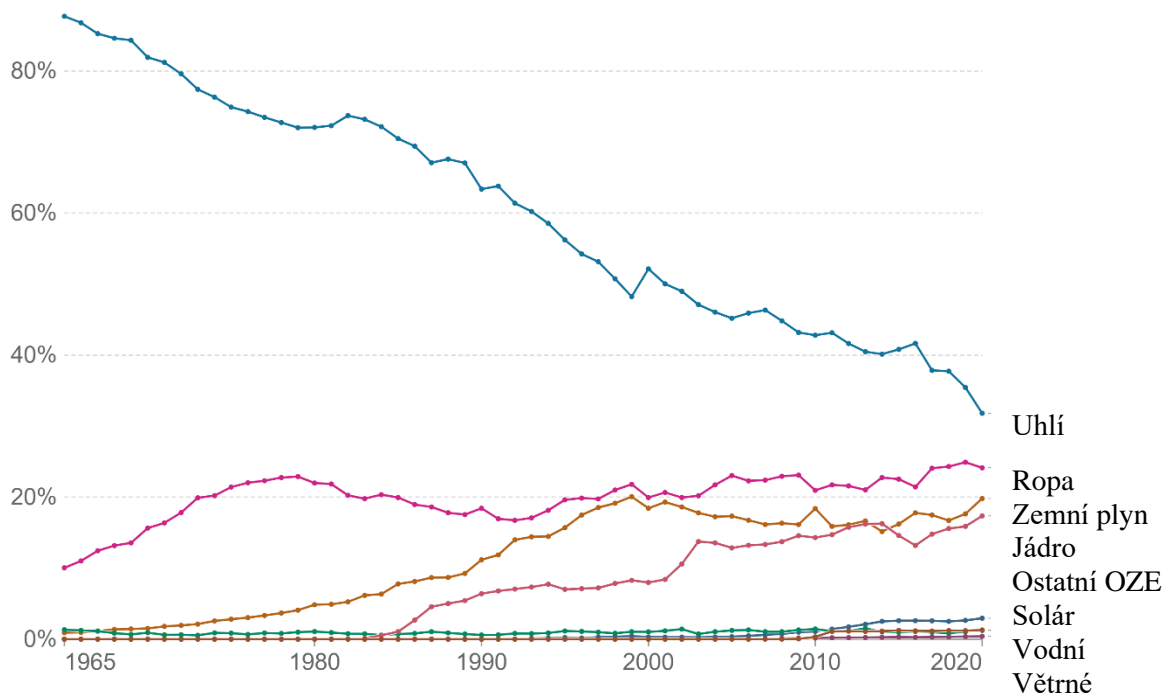
Materiál	Tloušťka vrstvy [mm]	λ [W/m.K]	R [m².K/W]
Ocelový plech	0,8	-	-
Vzduchová mezera	100	-	0,18
Vnitřní	177,5	0,163	4,62
Minerální vata	80	0,034	1,91
Hliníkový panel	35	0,028	1,25
Minerální vata	50	0,035	1,40
Sádrokarton	12,5	0,25	0,05

Příloha č. 2 – schéma studovaného fasádního modulu [16]



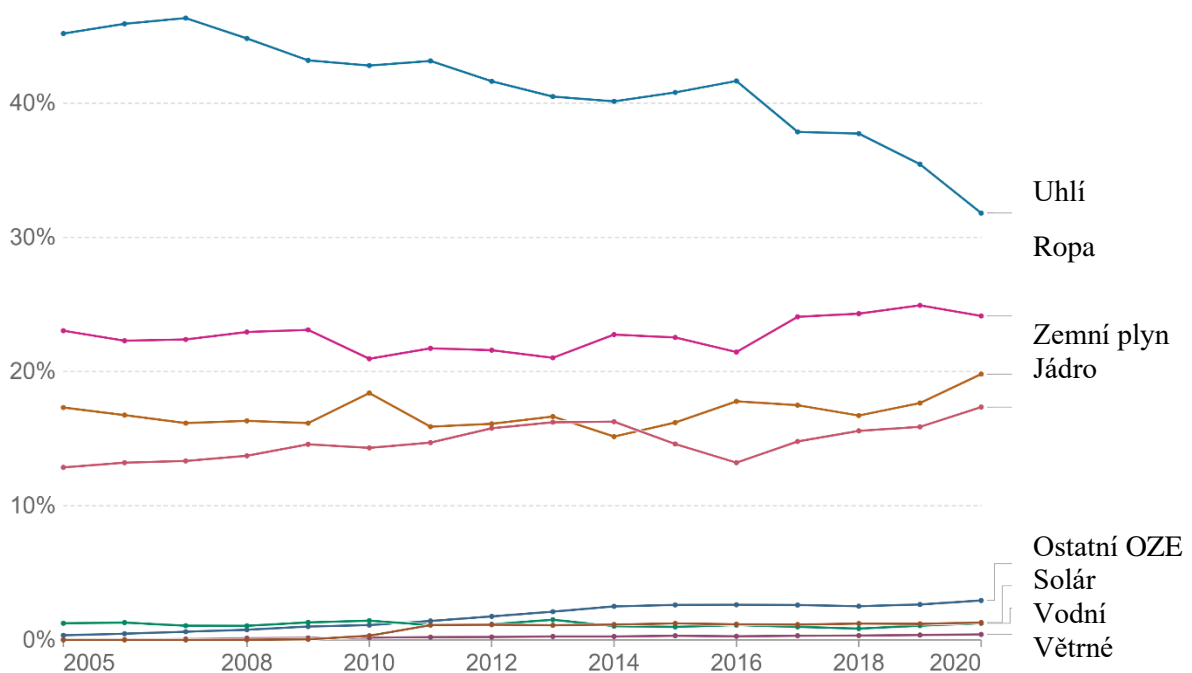
Příloha č. 3 [27]

Složení energetického mixu, Česká republika, 1965-2020



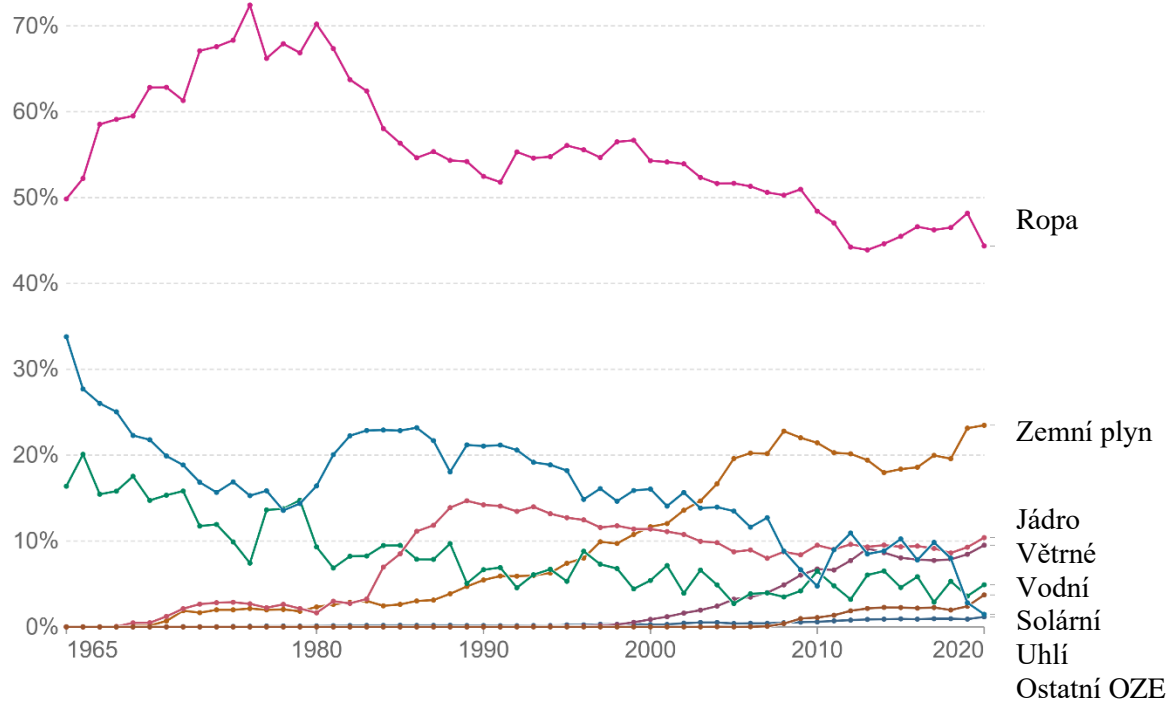
Příloha č. 4 [27]

Složení energetického mixu, Česká republika, 2005-2020



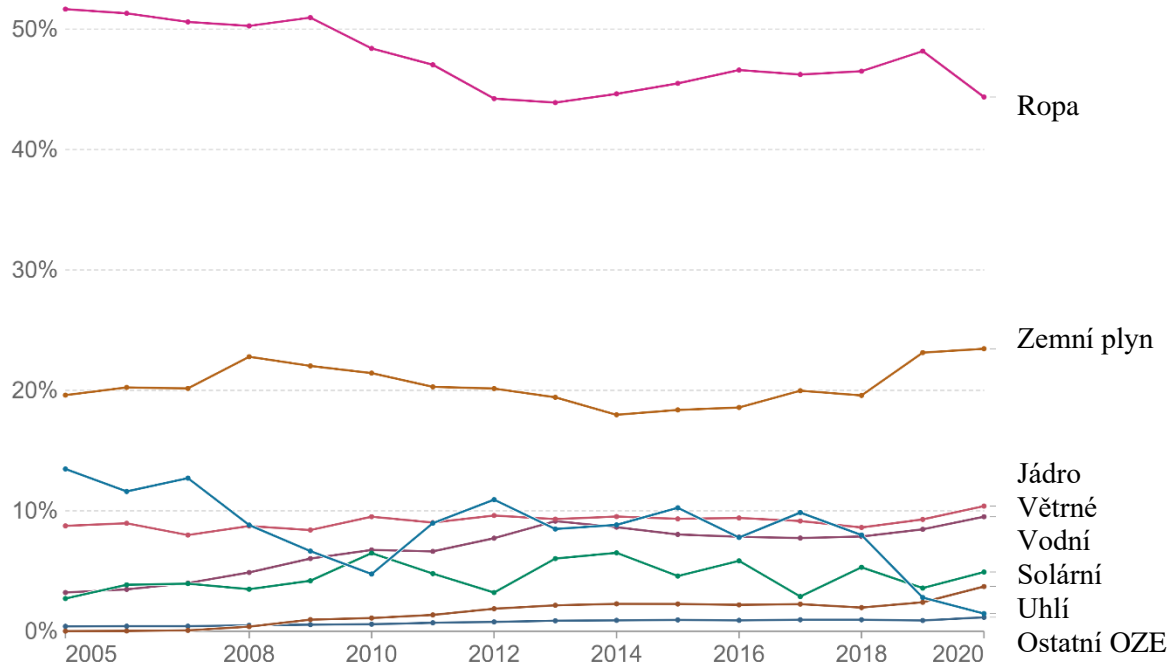
Příloha č. 5 [28]

Složení energetického mixu, Španělsko, 1965-2020

Our World
in Data

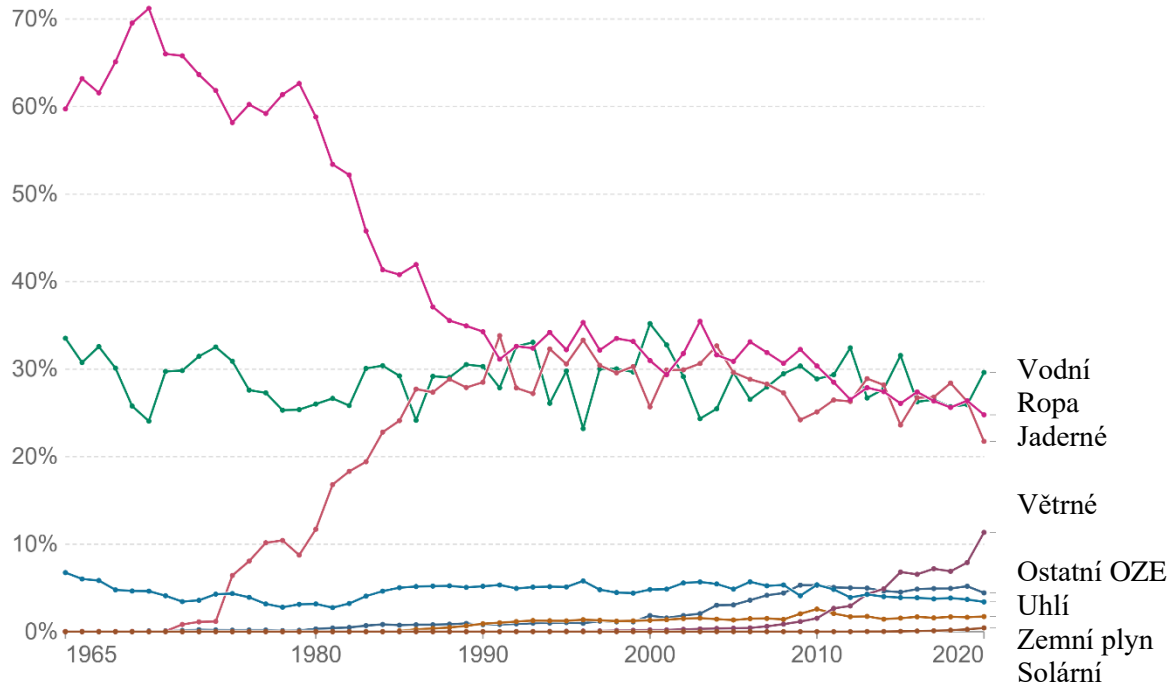
Příloha č. 6 [28]

Složení energetického mixu, Španělsko, 2005-2020

Our World
in Data

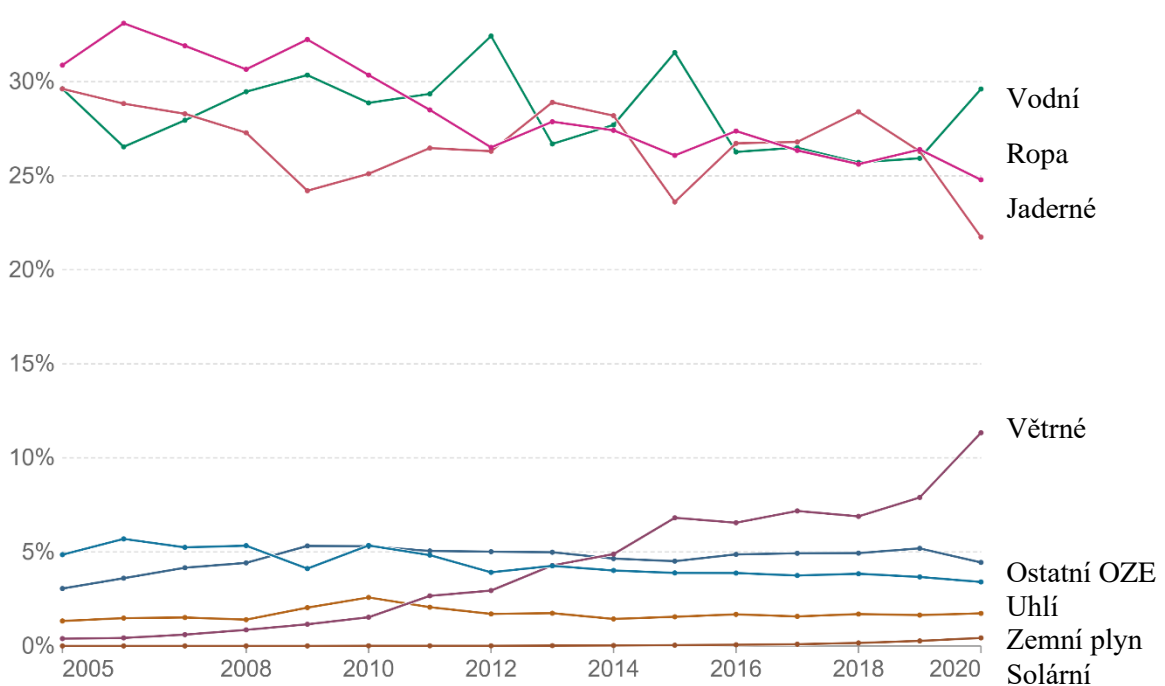
Příloha č. 7 [29]

Složení energetického mixu, Švédsko, 1965-2020



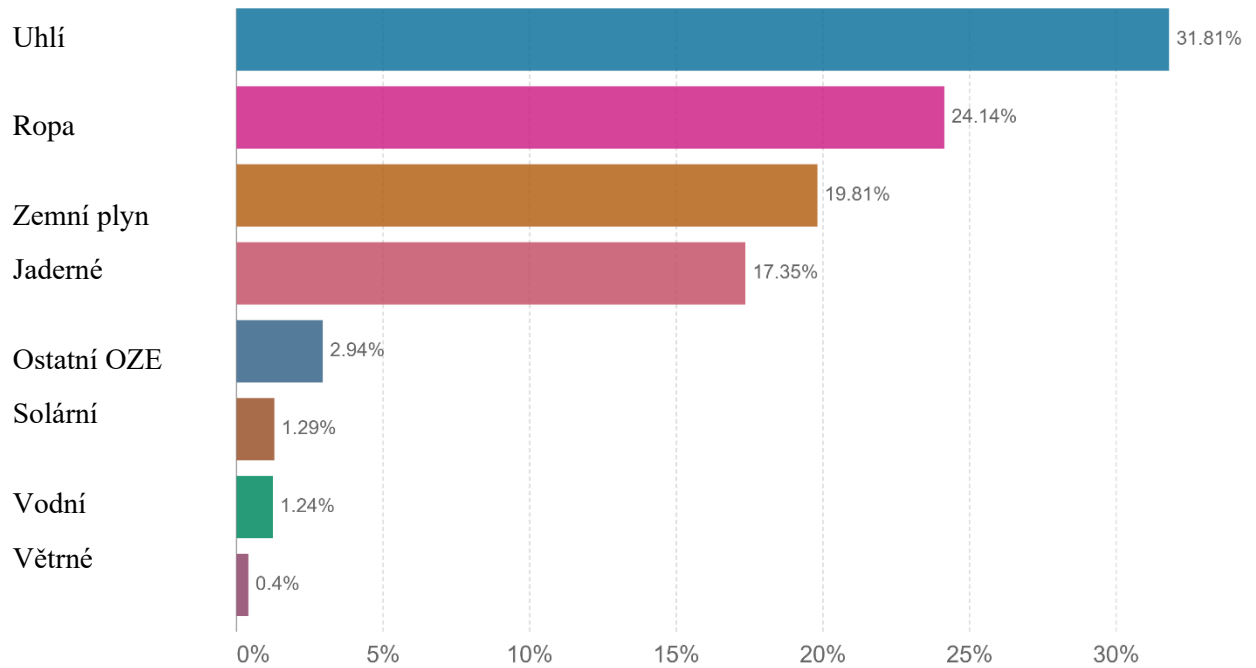
Příloha č. 8 [29]

Složení energetického mixu, Švédsko, 2005-2020



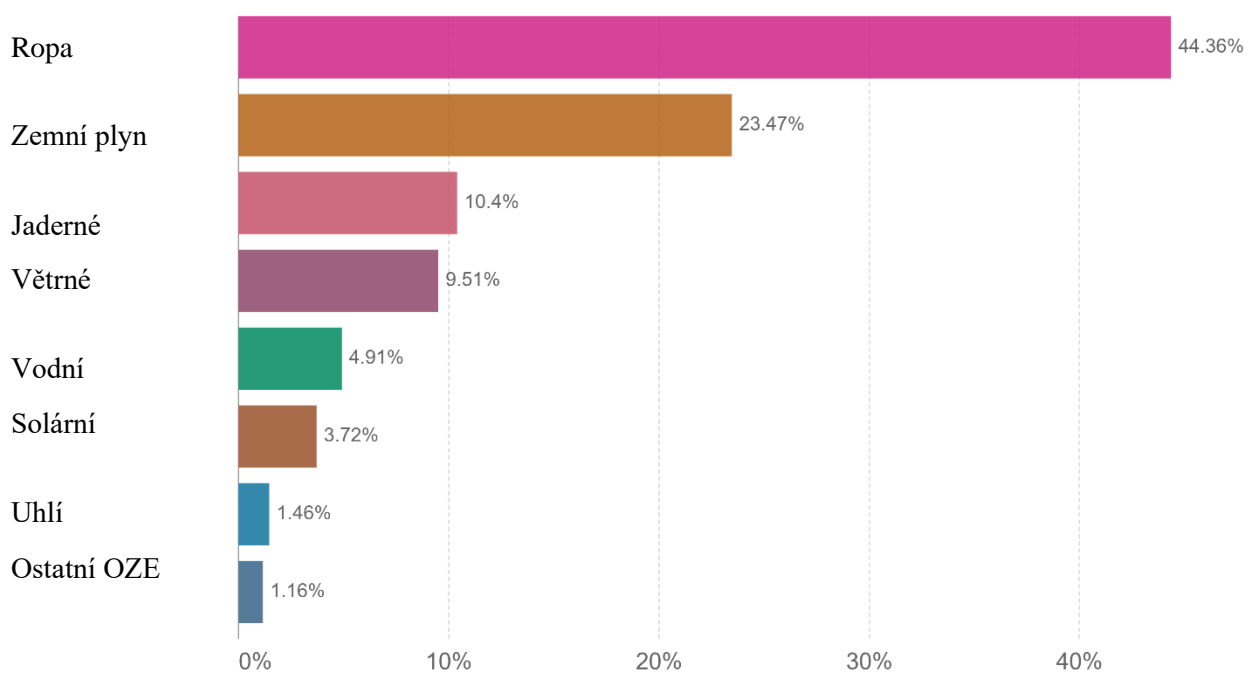
Příloha č. 9 [27]

Složení energetického mixu, Česká republika, 2020

Our World
in Data

Příloha č. 10 [28]

Složení energetického mixu, Španělsko, 2020

Our World
in Data

Příloha č. 11 [29]

Složení energetického mixu, Švédsko, 2020

Our World
in Data