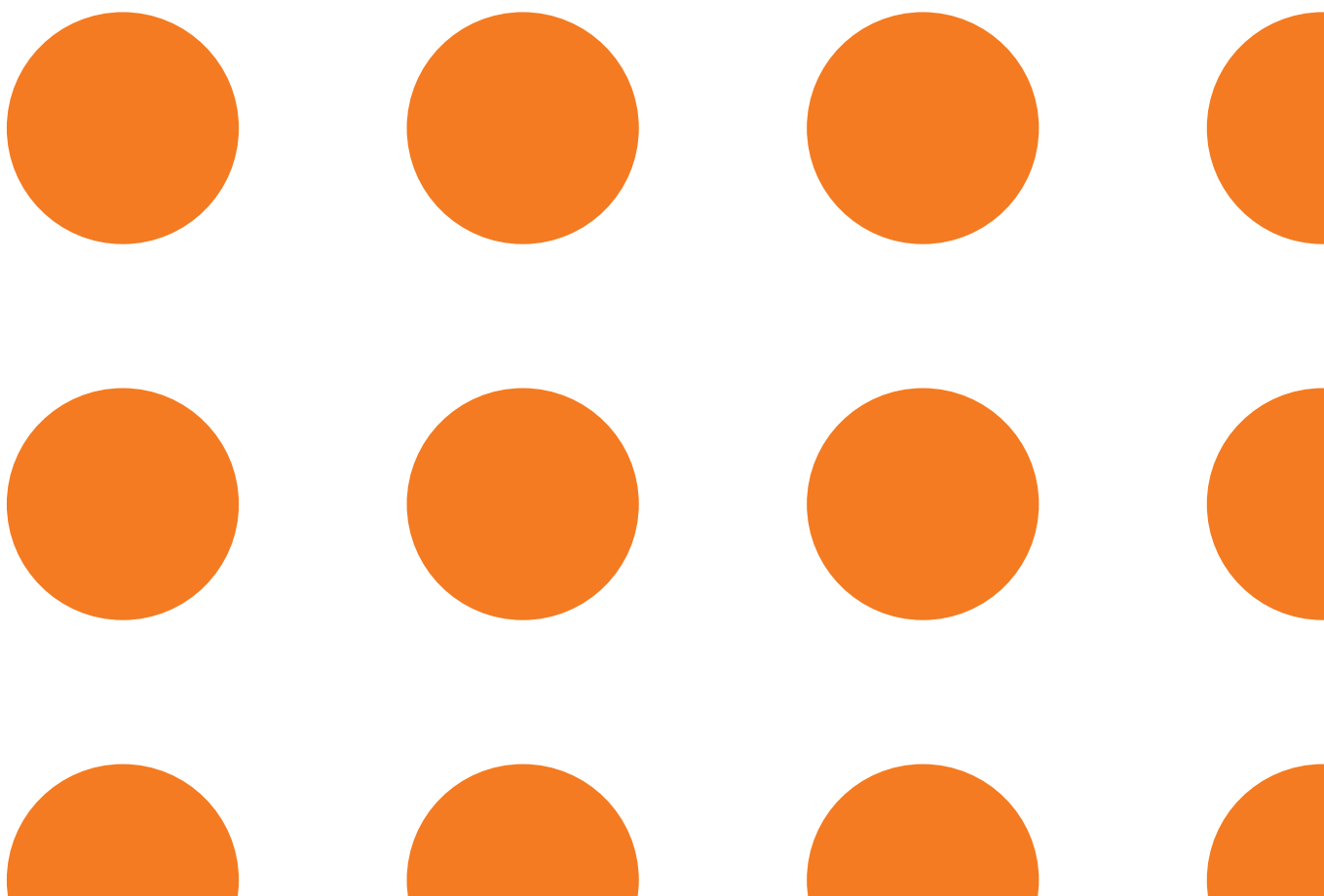


EDÍCIA SKRÍPT

JAKUB ČURPEK

INTEGROVANÉ FOTOVOLTICKÉ FASÁDY BUDOV



INTEGROVANÉ FOTOVOLTICKÉ FASÁDY BUDOV

Jakub Čurpek

Dielo je vydané pod medzinárodnou licenciou Creative Commons CC BY 4.0, ktorá povoľuje použitie, zdieľanie, prispôsobovanie, šírenie a reprodukovanie na ľubovoľnom médiu alebo v ľubovoľnom formáte, ak je uvedený pôvodný autor, zdroj a odkaz na Creative Commons licenciu, a ak sú vyznačené prípadné zmeny vykonané v diele. Viac informácií o licencii a použití diela na adrese: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.



© Ing. Jakub Čurpek, PhD.

Recenzenti: prof. Ing. Jozef Hraška, PhD.
prof. Ing. Vladimír Šály, PhD.

Schválila Edičná rada Stavebnej fakulty STU v Bratislave.

ISBN 978-80-227-5487-3

Obsah

PREDSLOV	4
1 ÚVOD	5
2 ENERGETICKÁ HOSPODÁRNOST'.....	6
3 FOTOVOLTIKA	11
3.1 PRINCÍP FOTOVOLTIKY	11
3.2 TYPY FOTOVOLTICKÝCH ČLÁNKOV	14
3.3 ELEKTRICKÉ ZAPOJENIE FV SYSTÉMOV	18
3.4 TYPY FOTOVOLTICKÝCH SYSTÉMOV	21
3.5 FOTOVOLTIKA V BUDOVÁCH.....	23
4 INTEGROVANÉ FOTOVOLTICKÉ SYSTÉMY (BIPV)	30
4.1 BIPV FASÁDY	33
4.1.1 <i>Prevetrávané BIPV fasády</i>	34
4.1.2 <i>Lahké BIPV fasády</i>	39
4.1.3 <i>Farebnosť BIPV fasád</i>	41
4.1.4 <i>Vývojové koncepty BIPV fasád</i>	43
4.2 BIPV+PCM SYSTÉMY	50
4.3 TIENIACE BIPV SYSTÉMY	59
4.4 VODNÉ BIPV SYSTÉMY	61
4.5 ZAKRIVENÉ BIPV SYSTÉMY	63
4.6 BIFACIÁLNE BIPV SYSTÉMY	64
4.7 BIPV SKLENENÉ SYSTÉMY	66
4.7.1 <i>Klasické zasklenia</i>	66
4.8 BIPV BALKÓNY.....	67
5 POŽIARNA BEZPEČNOSŤ BIPV.....	68
LITERATÚRA	70

Predslov

Objavenie, využívanie a distribúcia elektrickej energie priniesli pre tento svet obrovské príležitosti pre rozvoj vo všetkých sférach hospodárstva, stačí sa len pozrieť na žiarovku, ktorá Vám svieti v lampe pri večernom čítaní tejto literatúry. Samotný objav a skonštruovanie transformátora umožnilo distribúciu elektrickej energie z elektrárne na dlhé vzdialenosti s relatívne malými stratami. Avšak prečo si nevyrobiť elektrickú energiu priamo na budove? Predkladaná publikácia si kladie za cieľ predostrieť zvedavému čitateľovi/čitateľke základný rámec v oblasti integrácie fotovoltických systémov priamo do fasád budov spolu s vedeckými trendmi v danej oblasti. Podstatou je, aby sme sa nepozerali na fasádu budovy ako iba na nejaký výrazový prvok, ale aj ako na príležitosť pre využívanie obnoviteľných zdrojov energií. Samotný text v istých momentoch nabáda k skúmaniu nových možností aplikácie týchto systémov nielen z hľadiska produkcie elektrickej energie. Ostatné oblasti stavebnej fyziky tu však nie sú opomenuté a musí sa s nimi uvažovať pri navrhovaní budovy. Pevne verím, že vám predmetná literatúra poskytne širší pohľad na fasády budov z hľadiska aplikácie solárnych technológií.

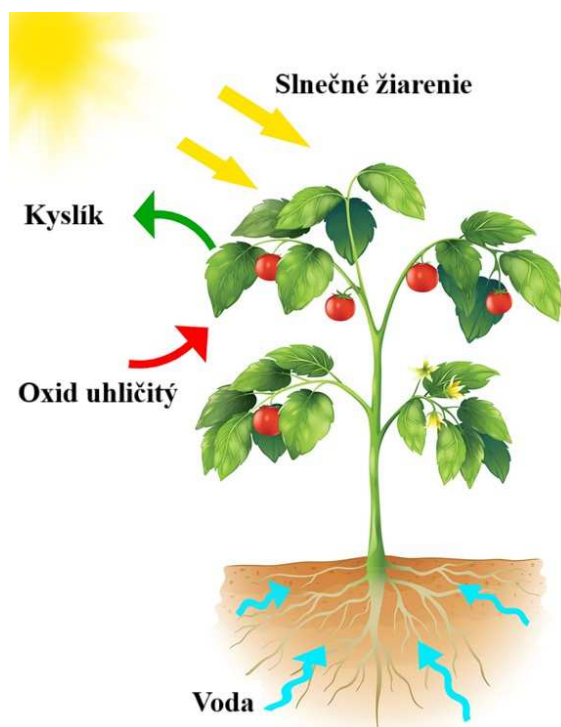
Vďaka patrí Vedeckej grantovej agentúre MŠVVaM SR v rámci projektu VEGA 2/0145/24, ako aj projektu PVPCMGLASS v rámci grantovej schémy na podporu excelentných tímov mladých výskumníkov Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Ďakujem recenzentom – prof. Ing. Jozefovi Hraškoví, PhD., a prof. Ing. Vladimírovi Šálymu, PhD., za podrobnú kritiku a pripomienky k textu, ktoré v zásadnej miere prispeli k skvalitneniu publikácie. Ďakujem Ing. Zuzane Lacovej, PhD., za konzultáciu a pripomienky v oblasti požiarnej bezpečnosti budov.

Autor

1 Úvod

Integrované fotovoltaické systémy budov (BIPV) sa postupne začínajú uplatňovať v stavebnej praxi a určite bude v blízkej budúcnosti už nevyhnutné s nimi uvažovať pri celkovom energetickom koncepte budovy. Predmetná publikácia si kladie za cieľ predstaviť súčasné koncepty a vývojové stupne integrácie fotovoltaiky do fasád budov. Hlavný dôraz sa kladie na predstavenie najnovších konceptov ich súčasného vývoja, špeciálne v kombinácii s inými pokročilými materiálmi a technológiami. Z technického a technologického hľadiska fasádne BIPV systémy sa najlepšie a najjednoduchšie realizujú na nových budovách, keď sú už zakomponované v návrhovej fáze projektu, avšak je možné ich realizovať aj na starších budovách, kde je predovšetkým potrebné uvažovať s vyššími nákladmi a zásahom do celkového vzhľadu budovy. Jednoduché BIPV systémy poskytujú iba produkciu elektrickej energie, ktorej účinnosť je zatiaľ ešte nízka, ale postupne vo výskume polovodičových materiálov sa dá povedať, že sa jej percentuálny podiel zvyšuje. Je potrebné poukázať aj na snahy racionálneho využitia tepelnej energie vyprodukovanej na zadnej strane BIPV konštrukcie, ktorá vykazuje atribúty oveľa komplexnejšej problematiky. Kombinované hybridné systémy a ich neustále vylepšovania sú práve tie, od ktorých sa dá očakávať, že sa začnú častejšie implementovať aj na stavebnom trhu. Vytýčené ciele energetických politík Európskej únie bude možné dosiahnuť zakomponovaním aj práve takýchto konštrukcií do návrhu budovy.



„Budovy v našom urbanistickom ekosystéme musia vykonávať podobnú funkciu ako stromy v lese. Takýmto spôsobom bude budova zbierať energiu prostredníctvom svojho vonkajšieho povrchu a bude schopná ju rozumne transformovať a akumulovať pre svoje vlastné potreby.“

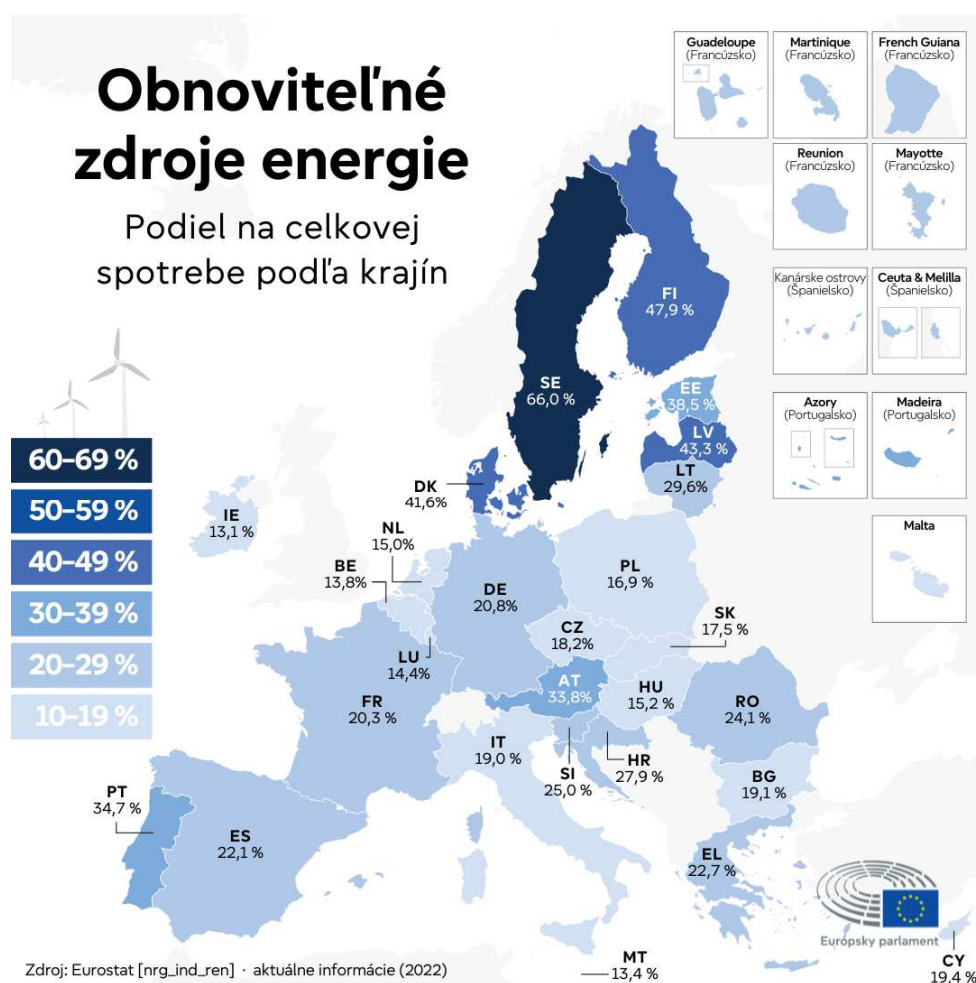
Serra i Florensa & Leal Cueva

[Practical Handbook of Photovoltaics Fundamentals and Applications, 2nd Edition]

Zdroj: <https://photosynthesiseducation.com>

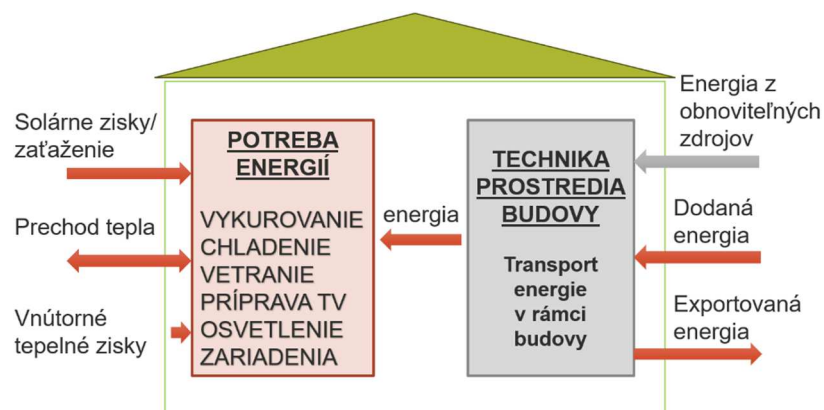
2 Energetická hospodárnosť

Vzájomné konflikty medzi krajinami, odkiaľ pochádza značné množstvo fosílnych palív, majú priamy vplyv na svetovú energetickú politiku. Taktiež v súčasnosti nastáva nárast globálnych javov prehrievania našej planéty. Produkcia a transport energie sú vitálne dôležité pre chod našej spoločnosti od priemyselnej revolúcie v 19. storočí. Blaho ľudí, priemyslu a ekonomiky závisí hlavne na bezpečnosti, istote a udržateľnosti cenovo dostupnej energie. Užívatelia budov využívajú energiu v rôznych formách, ako je tepelná, elektrická, mechanická energia alebo iné špecifické formy, avšak v rôznych časových intervaloch: denne, týždenne a sezónne [1]. Smernica Európskeho parlamentu a Rady 2018/2001 si kladie za cieľ dosiahnuť aspoň 42,5 % podielu energie z obnoviteľných zdrojov na hrubej konečnej energetickej spotrebe Európskej únie (EÚ) v roku 2030 [2]. Podiel obnoviteľných zdrojov na spotrebe energie v EÚ dosiahol 23,0 % v roku 2022 (Obr. 2.1), pričom v roku 2021 to bolo 21,8 %. Pre jednotlivé odvetvia v EÚ bolo stanovené zvyšovanie podielu obnoviteľných zdrojov energie, obzvlášť pre budovy je cieľom dosiahnuť 49 % využívania obnoviteľných zdrojov energie do roku 2030.



Obr. 2.1 Obnoviteľné zdroje energie v EÚ v roku 2022 [3]

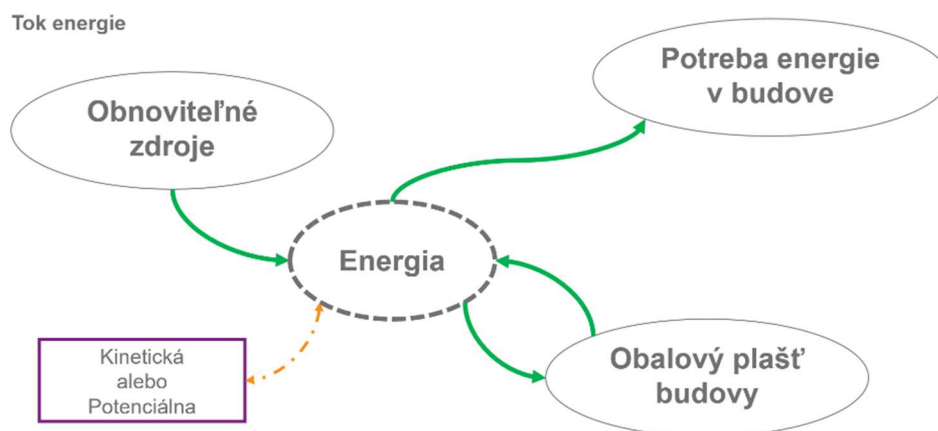
Budovy v súčasnosti spotrebovávajú viac ako 40 % z celkovej spotreby energie v EÚ. Zníženie spotreby energie a využívanie ekologicky čistej energie z obnoviteľných zdrojov v tomto sektore spoločne predstavujú dôležité opatrenia potrebné na zníženie energetickej závislosti budov napojených na centrálné zdroje (produkujúce energiu z fosílnych palív). Renovácia existujúceho fondu budov na úroveň pripravenosti pre nulové emisie CO₂ je kľúčová v rámci dosiahnutia cieľov dekarbonizácie na roky 2030 a 2050. Rozšírenie podielu elektrickej energie na konečnej spotrebe energie budov je kľúčovým míľnikom, ktorý je potrebné dosiahnuť v scenári čistých nulových emisií do roku 2050 (Net Zero Emissions – NZE scenár), podľa ktorého sa solárna a veterná energia využívaná pri výrobe elektriny zvýši z 9 % v roku 2020 na 40 % v roku 2030 (mnohí odborníci tieto ciele kritizujú a z viacerých dôvodov spochybňujú). Prírastky budú podporené zvýšenou elektrifikáciou vykurovania a prípravou teplej vody, ako aj rastúcim dopytom po chladiení priestorov a nových elektrických spotrebičoch. Vďaka znižovaniu nákladov na technológie, politickej podpore a vyspelosti technológií sa predpokladá dosiahnutie podielu fotovoltiky a veternej energie na výrobe elektriny do roku 2050 v scenári NZE 68 % [4]. Klimatické podmienky a energetické vlastnosti budovy sú vo vzájomnej dynamickej interakcii. Celkový tok energií v budove je určený nárokmi na požadovanú úroveň vnútorného prostredia (Obr. 2.2). Samotná úroveň dodanej energie do budovy môže byť zvýšená práve priamym využívaním slnečného žiarenia, pričom pre zabezpečenie energie počas zamračených dní a nocí je potrebné integrovať aj zariadenia na uskladnenie energie.



Obr. 2.2 Schematický diagram toku energie v budove

Samotná energia predstavuje schopnosť konať prácu, resp. energia sa premieňa na prácu a naopak, pričom existuje niekoľko druhov energií, ktoré možno zosumarizovať na dva základné druhy: potenciálna energia, ktorá je uložená v objekte v dôsledku jeho polohy alebo usporiadania, a kinetická energia, ktorá je v objekte v dôsledku jeho pohybu. Obalový plášť

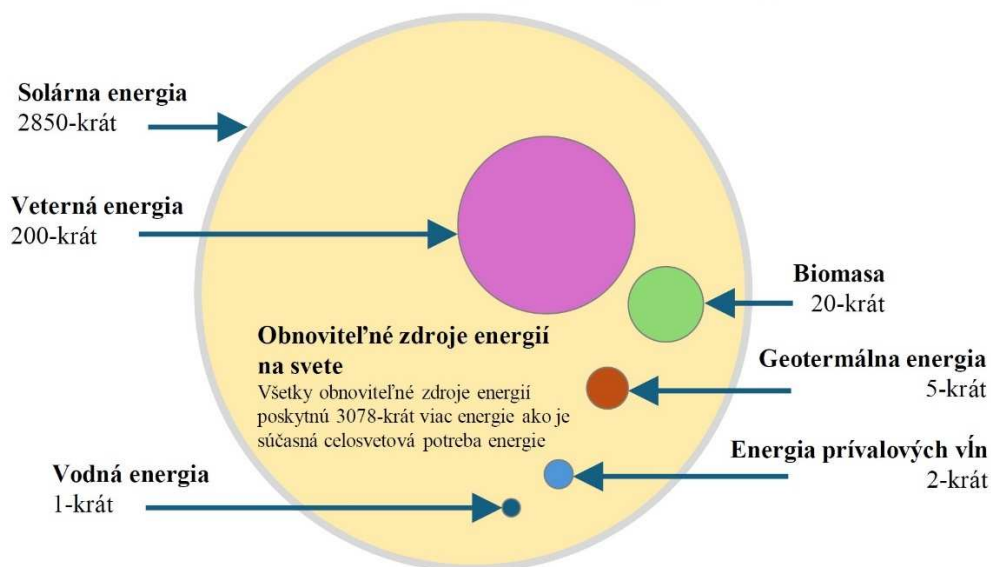
budovy dokáže svojou správnou konfiguráciou zmysluplne využívať obidve tieto formy energie na priame pokrytie potreby energie v budove (Obr. 2.3).



Obr. 2.3 Tok energie medzi jednotlivými technológiami v budove

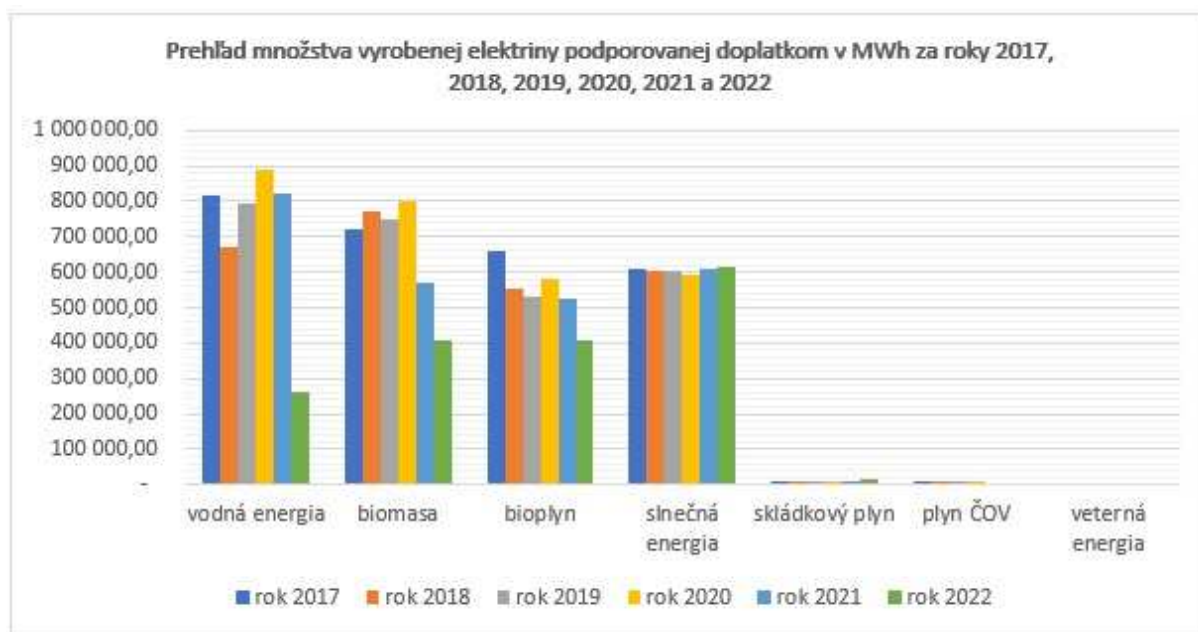
Jedným z kľúčových kritérií zvyšovania energetickej hospodárnosti budov je využitie obalového plášťa budovy na distribúciu, premenu a uskladnenie energie najmä z obnoviteľných zdrojov. Energia zo Slnka (slnečná energia) je jedným z najlepších typov obnoviteľných zdrojov, hlavne pre svoju čistotu, neobmedzenosť a nekonečnosť. V podstate takmer každý druh energie na Zemi pochádza zo slnečnej energie, napr. spaľovaním fosílnych palív sa v podstate uvoľňuje energia uložená v starých rastlinách, ktoré boli milióny rokov pochované pod zemou a vytvorené činnosťou Slnka. Okrem toho je účinok slnečného žiarenia úzko spojený s veternou energiou. Všetky dostupné obnoviteľné zdroje energií (OZE) na svete dokážu v kombinácii poskytnúť 3078-krát viac energie ako je globálna potreba energie na svete (Obr. 2.4).

Potenciál obnoviteľných zdrojov energií



Obr. 2.4 Teoretický potenciál OZE v porovnaní s globálnou potrebou energie vo svete [5]

Úrad pre reguláciu sieťových odvetví Slovenskej republiky uvádza, že na celkovej výrobe elektriny v našej krajine predstavovala elektrina vyrobená z OZE úroveň 22,90 % pre rok 2022, čo predstavuje zvýšenie o 1,60 % oproti roku 2021. V rámci nedávnej histórie možno poukázať na skoro rovnaký trend výroby energie zo slnečnej energie (Obr. 2.5) [6].

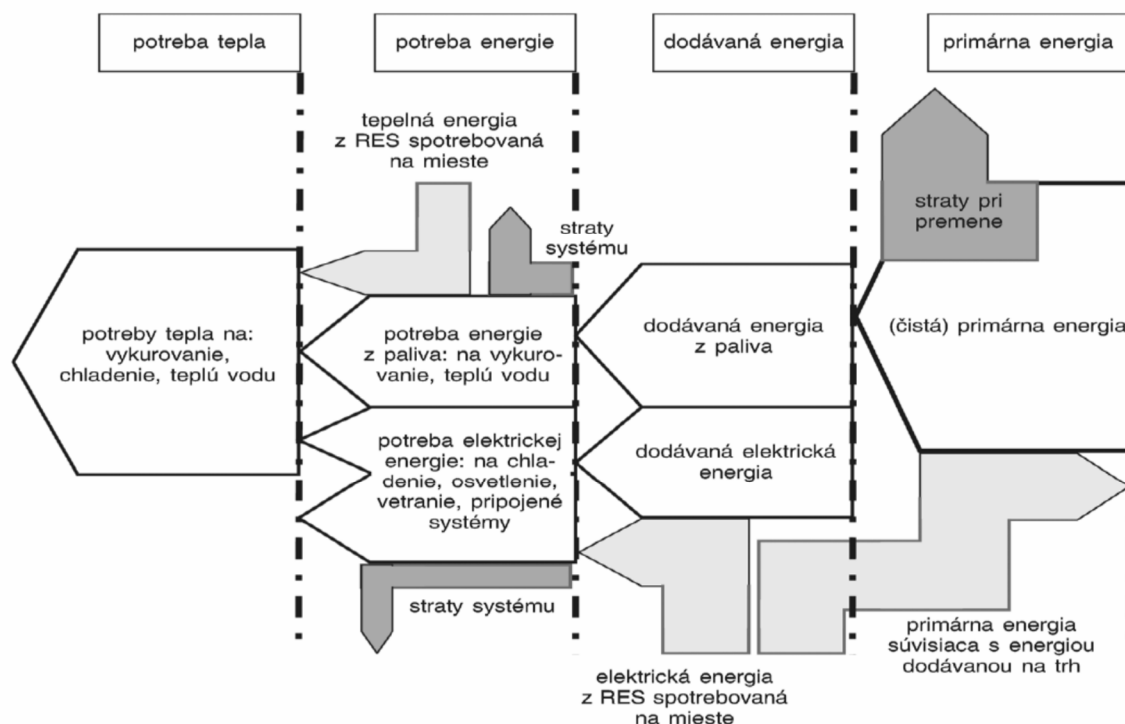


Obr. 2.5 Vývoj výroby elektrickej energie z OZE (2017 – 2022) podľa jednotlivých typov [6]

V súčasnosti sa na Slovensku stavajú bytové a nebytové budovy hlavne v energeticky úspornej úrovni výstavby (ultranízkoenergetické budovy). Avšak sú ojedinele známe prípady výstavby budov s takmer nulovou potrebou energie (BTNPE), ktoré majú iný energetický koncept. Samotná definícia BTNPE podľa zákona č. 555/2005 Z. z. o energetickej hospodárnosti budov [7] znie:

„Budovou s takmer nulovou potrebou energie sa rozumie budova s veľmi vysokou energetickou hospodárnosťou. Takmer nulové alebo veľmi malé množstvo energie potrebné na užívanie takej budovy musí byť zabezpečené efektívnou tepelnou ochranou a vo vysokej miere energiou dodanou z obnoviteľných zdrojov nachádzajúcich sa v budove alebo jej blízkosti.“

Hodnotenie budov podľa znenia danej smernice EÚ sa zameriava na globálny ukazovateľ, ktorým je primárna energia. Na zabezpečenie zníženia potreby primárnej energie treba zaviesť opatrenia na zlepšenie celkovej energetickej účinnosti stavby. Ďalšie opatrenia by mali brať do úvahy klimatické a miestne podmienky. Samotný výpočet energetickej hospodárnosti budov (EHB) vyžaduje niekoľko postupov a krokov od potreby tepla po potrebu primárnej energie (Obr. 2.6).



Obr. 2.6 Schematické zobrazenie postupu výpočtu EHB až po potrebu primárnej energie [8]

Minimálne požiadavky na energetickú hospodárnosť budov (EHB) stanovuje vyhláška č. 35/2020 Z. z. [9], ktorou sa mení a dopĺňa vyhláška Ministerstva dopravy, výstavby a regionálneho rozvoja SR č. 364/2012 [10], ktorou sa vykonáva zákon č. 555/2005 Z. z. o energetickej hospodárnosti budov [7] a o zmene a doplnení niektorých zákonov v znení neskorších predpisov v znení vyhlášky č. 324/2016 Z. z. [11]. Stanovenie týchto požiadaviek vychádza z hornej hranice učených energetických tried pre príslušnú kategóriu budovy. Pre dosiahnutie jednotlivých parametrov budovy s takmer nulovou potrebou energie je za potreby vychádzať z troch na seba nadväzujúcich kritérií:

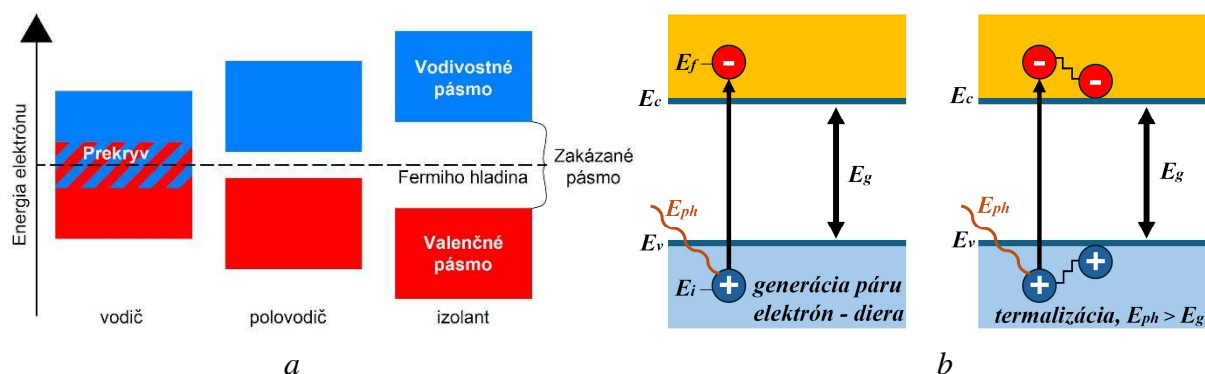
- Zníženie mernej potreby tepla na vykurovanie na minimum
(vyžaduje kvalitný návrh obalových konštrukcií budovy a využitie solárnych a vnútorných ziskov).
- Zníženie spotreby primárnej energie na vykurovanie, chladenie, vetranie, prípravu teplej vody a osvetlenie
(očakávané zníženie potreby primárnej energie približne o 50 % bude mať priamy dopad na zníženie emisií CO₂).
- Značné pokrytie celkovej potreby primárnej energie pomocou OZE
(integrované OZE v budove alebo v jej blízkosti by mali dopomôcť dosiahnuť najmenej 50 %-né zníženie primárnej energie).

3 Fotovoltika

Slnčná energia sa v súčasnosti považuje za jeden z najperspektívnejších obnoviteľných zdrojov energií. Zo všetkých doposiaľ objavených solárnych technológií sa fotovoltika javí ako jedna z najviac sľubných solárnych technológií, a to pre celkové vyrovnanie a úsporu emisií CO₂ pri výrobe fotovoltických (FV) modulov po dobu 3 až 4 rokov. FV články transformujú určitú časť dopadajúceho slnečného žiarenia na elektrickú energiu prostredníctvom svojej polovodičovej štruktúry, ktorá môže pozostávať z rôznej materiállovej základne, podľa ktorej sa odvíja ich celková koncepcia a v konečnom dôsledku aj ich účinnosť a stabilita výkonu.

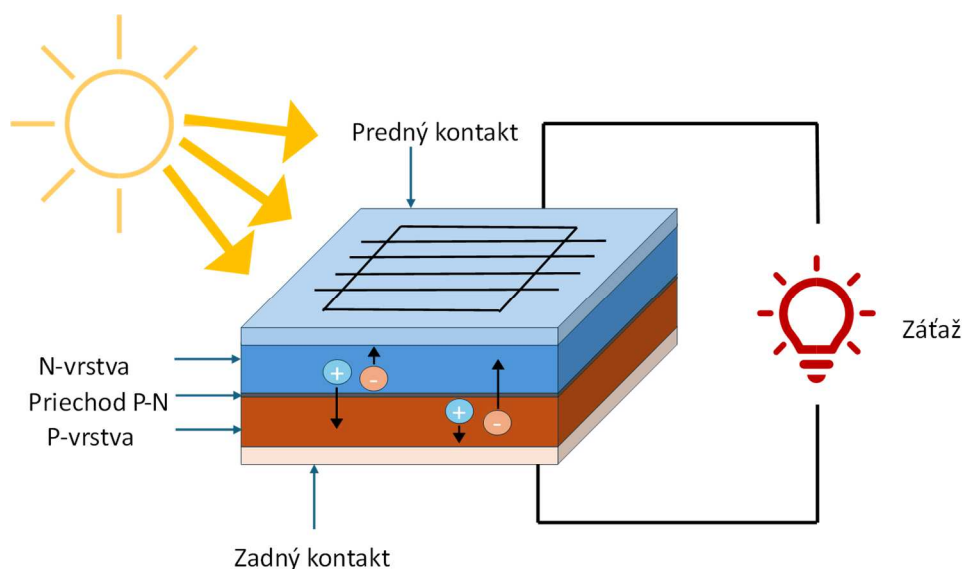
3.1 Princíp fotovoltiky

Fotovoltický jav objavil Alexander Bequerel v roku 1839 a vysvetlil Albert Einstein, čím zásadne prispel k pochopeniu fotovoltického javu v roku 1905, keď publikoval vedeckú prácu vysvetľujúcu fotoelektrický jav, za čo neskôr, v roku 1921, získal Nobelovu cenu za fyziku. Následne po vyhotovení prvého FV článku v Bellových laboratóriách (1954) sa začala táto technológia chronologicky transformovať do jednotlivých odvetví hospodárstva. FV články sú zložené z polovodičových prvkov a predstavujú zariadenie schopné premieňať slnečné žiarenie na elektrickú energiu bez nejakých pohyblivých častí, hluku a znečistenia. Fyzikálny fenomén tejto premeny je založený na princípe dopadu slnečného žiarenia tvoreného časticami nazývanými fotóny. Fotón, tiež nazývaný svetelné kvantum, nesie so sebou dostatočné energetické množstvo elektromagnetického žiarenia schopné svojou energiou zvýšiť elektrickú vodivosť polovodiča (vnútorný fotoelektrický jav). Elektróny na poslednej valenčnej vrstve v atómovej štruktúre polovodiča sú k atómovému jadru viazané najmenšou väzbovou energiou, čím sa dokážu uvoľniť v dôsledku dopadu fotónu. Uvoľnené elektróny sú následne voľne pohyblivé, takže po zapojení do elektrického obvodu dokážu vytvoriť jednosmerný prúd. Na ich pôvodnom mieste ostáva kladný náboj, tzv. diera (Obr. 3.1b). Samotné odtrhnutie dostatočného množstva elektrónov je určené šírkou zakázaného pásu E_g [eV] (*angl. band gap*) (Obr. 3.1a). Elektrickú vodivosť polovodiča určuje koncentrácia voľných nosičov náboja, ktorá súvisí s teplotou. Absorbované fotóny s dostatočnou energiou zvyšujú koncentráciu nosičov náboja, a teda aj vodivosť.



Obr. 3.1 Princíp hodnoty zakázaného pásu polovodičov: a – schéma elektrónovej pásovej štruktúry, b – ilustrácia absorpcie fotónu v polovodiči so zakázaným pásom (E_g) [12]

Drvivá väčšina FV článkov je zložená z kremíka ($E_g = 1,1$ eV), s chemickou značkou Si. Samotný kremík sa v prírode vyskytuje iba vo forme zlúčenín a po kyslíku je druhým najviac rozšíreným prvkom v štruktúre zemskej kôry. Pre elektrotechnický priemysel má kremík svoje značné postavenie, nakoľko pre svoje vlastnosti (technológia, dostupnosť, využiteľnosť) predstavuje hlavnú surovinu na výrobu elektronických zariadení. Vzhľadom na tento fakt nesie významná oblasť na juhu Kalifornie v USA, kde sú sústredené firmy zaoberajúce sa práve odvetvím elektroniky, názov Silicon Valley (Kremíkové údolie). Samotné zloženie FV článku pozostáva z dvoch rozdielne dopovaných kremíkových vrstiev. Predná strana (n-vrstva) je dopovaná fosforom, na nej sa nachádza elektróda v podobe tenkej mriežky (pre maximálne zvýšenie nepokrytej plochy FV článku), zadná strana (p-vrstva) je kladne dopovaná bórom a na tej je väčšinou celoplošne umiestnená elektróda (Obr. 3.2). V n-vrstve prevládajú negatívne nabité elektróny a v p-vrstve sa nachádzajú diery, ktoré je možné opísať ako prázdne miesta ľahko absorbujúce elektróny. Medzi týmito dvomi vrstvami sa nachádza p-n, kde dochádza k separovaniu elektrónov a dier generovaných svetlom. Separovanie zabezpečuje vnútorné elektrické pole rozhrania p-n. Povrch článku, na ktorý dopadá slnečné žiarenie, musí byť opatrený antireflexnou vrstvou, aby sa znížila odrazivosť a zvýšila absorpcia fotónov. Kvalita a charakter celkovej antireflexnej vrstvy dáva šedým kremíkovým článkom ich typickú čiernu farbu pri monokryštalických článkoch, prípadne modrú farbu pri polykryštalických článkoch [13].



Obr. 3.2 Fotovoltický efekt

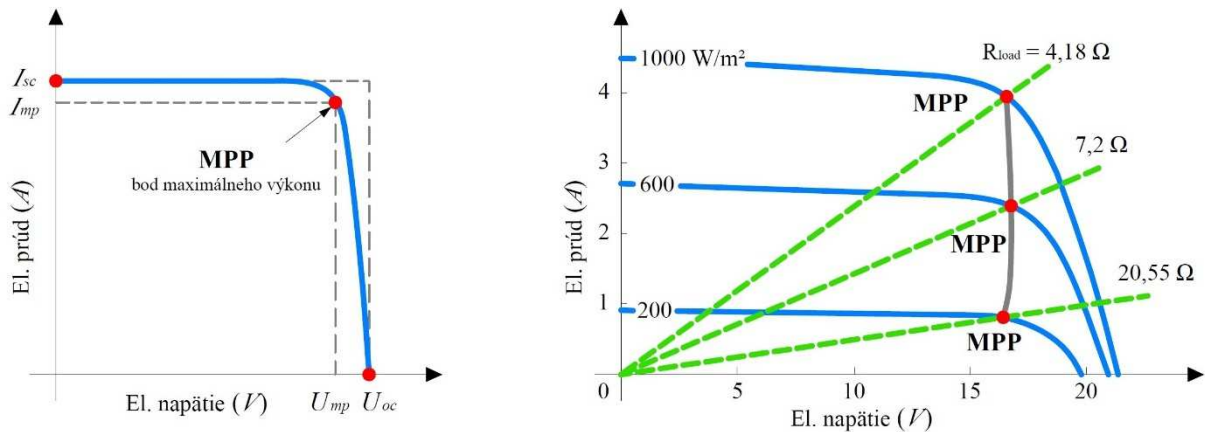
Výkon generovaný FV článkom (P) je vyjadrený súčinom svorkového napätia (U) a prúdu (I) v závislosti od vonkajšej odporovej záťaže aplikovanej v elektrickom obvode ($P = U \cdot I$). Hlavné parametre FV modulu uvádzané výrobcom sú:

- špičkový výkon (P_{max}) [W];
- prúd na krátko (I_{sc}) [A], ktorý preteká vonkajším obvodom, keď je FV modul pripojený k záťaži s nízkou impedanciou;
- napätie na prázdno (U_{oc}) [V], pri ktorom v obvode netečie žiadny elektrický prúd;
- faktor plnenia (FF) [-].

Bod maximálneho výkonu (Maximum power point – MPP) na I - U krivke FV článku predstavuje bod, v ktorom je vyprodukovaný výkon na maximálnej úrovni s príslušným napätím (U_{mp}) a prúdom (I_{mp}) (Obr. 3.3). FV články pracujú na úrovni MPP bodu, avšak prakticky pracujú s bodom na I - U krivke, zodpovedajúcej I - U charakteristike elektrickej záťaže, ku ktorej sú pripojené. Elektrická záťaž schopná meniť svoj odpor (R_{load}) podľa slnečného žiarenia tak, aby sledovala MPP, sa nazýva sledovač bodu maximálneho výkonu (maximum power point tracker). Maximálna účinnosť FV (η) je pomer G (solárneho žiarenia) premeneného na elektrinu pri P_m (bod elektrického maximálneho výkonu) k celkovému nameranému solárnemu žiareniu G dopadajúcemu na plochu FV povrchu (A), keď je FV článok pripojený na elektrický obvod podľa štandardných testovacích podmienok (Standard Test Condition – STC), kde $G = 1000 \text{ W.m}^{-2}$, teplota FV článku (T_{cell}) $T_{cell} = 25^\circ \text{C}$ a hodnote (air-mass – AM) $AM = 1,5$ [14].

$$\eta = \frac{P_m}{G \cdot A} \quad (1)$$

$$FF = \frac{I_{mp} \cdot U_{mp}}{I_{sc} \cdot U_{sc}} \quad (2)$$



Obr. 3.3 Diagramy I-U charakteristiky FV článku: jednoduchý diagram s MPP (vľavo), tromi hodnotami G a čiarami odporového zaťaženia zodpovedajúcimi MPP pre každú úroveň žiarenia (vpravo) [15]

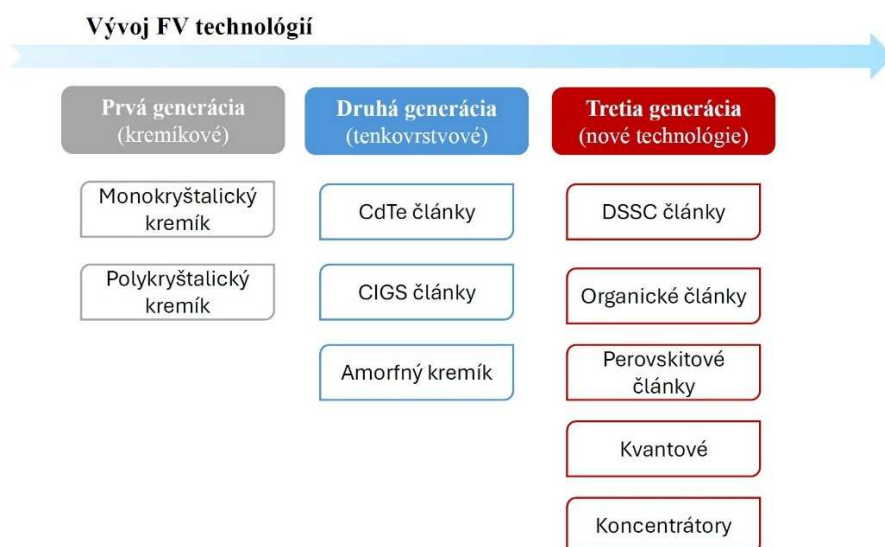
FV technológia je založená na rôznych typoch polovodičových materiálov (hlavne na kremíku, alebo bez kremíkovej bázy – nové typy), ktorých výkon je ovplyvnený mnohými faktormi. Dôležitý faktor je prevádzková teplota článku. Len zlomok slnečného žiarenia sa premieňa na elektrinu, zatiaľ čo zvyšná časť sa premení na teplo, čo spôsobí zvýšenie teploty a zníženie celkovej účinnosti FV systému a v konečnom dôsledku aj životnosti (delaminácia FV článku). Nominálna prevádzková teplota článku (Nominal operating cell temperature – NOCT) sa používa na formuláciu prevádzkovej teploty FV článku pri podmienkach nominálneho zemského prostredia (slnečné žiarenie 800 W.m^{-2} , rýchlosť vetra 1 m.s^{-1} , teplota okolia 20°C a nezaťažovacia prevádzka). Vysoká prevádzková teplota má niektoré špecifické fyzikálne vplyvy na FV článok: zmenšenie zakázaného pásma, zvýšenie vibrácií tepelnej mriežky, rast intrinzickej koncentrácie nosičov náboja, zníženie napätia v p-n priedoch FV štruktúry. Vplyv teploty na I_{sc} je podľa rovnice [16].

$$\frac{1}{I_{sc}} \cdot \frac{dI_{sc}}{dT} = 0,033 \% / K \quad (3)$$

3.2 Typy fotovoltických článkov

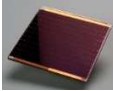
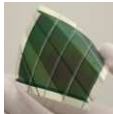
Fotovoltické články sa postupne vyvíjali v rámci implementácie troch kľúčových technológií (Obr. 3.4) a možno ich rozdeliť do jednotlivých skupín v závislosti od druhu použitých polovodičov. Monokryštalické silikónové články (mono c-Si) sú vyrobené z čistého kremíka a majú najvyššiu účinnosť, ale aj trochu vyššiu cenu. Polykryštalické kremíkové články (poly c-Si) sa vyrábajú použitím ingotu z multikryštalického kremíka, pre ľahší výrobný proces sú

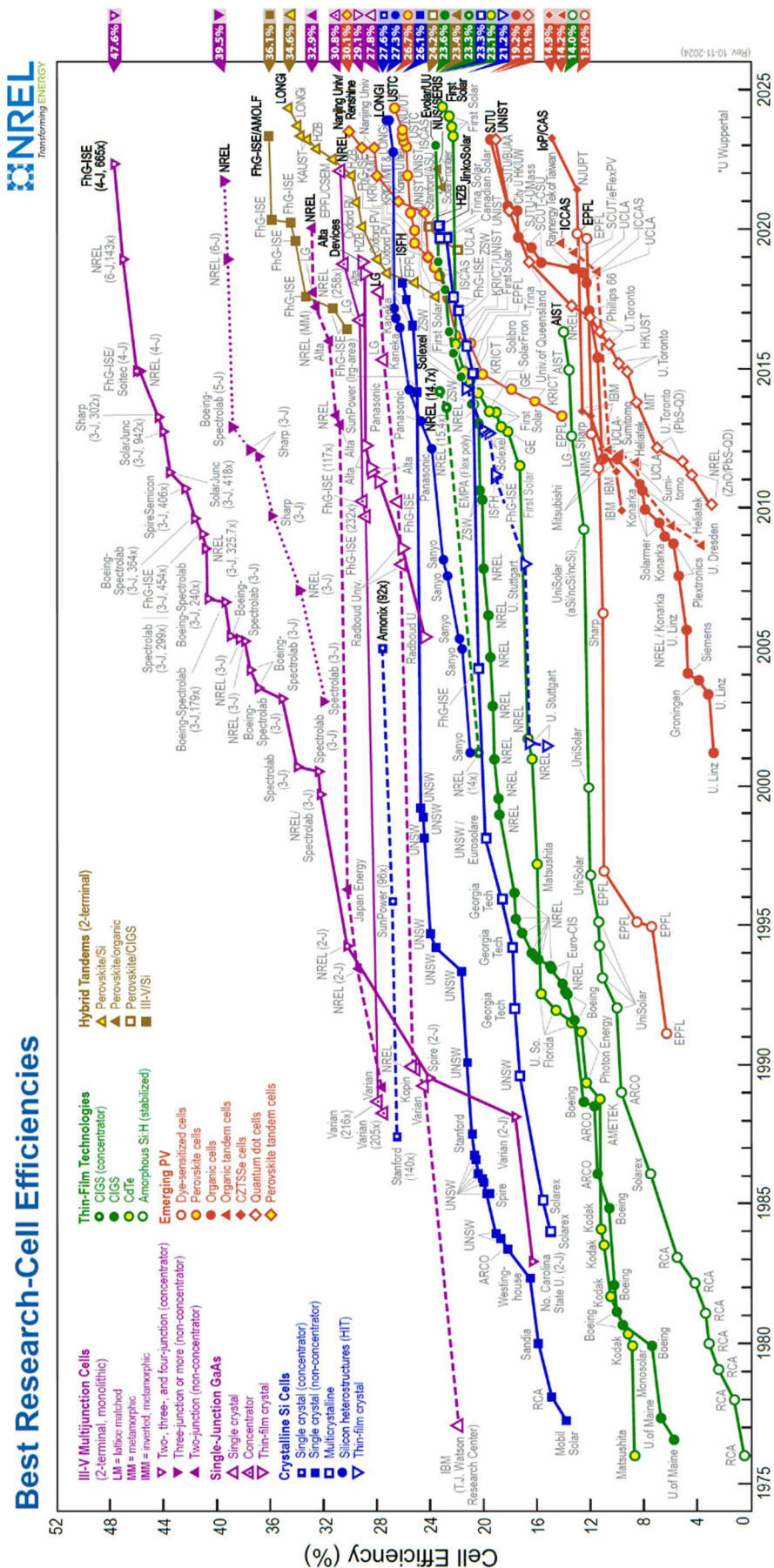
lacnejšie, ale zároveň majú menšiu účinnosť. Obidva tieto typy článkov sa vyrábajú vo forme tenkých plátok štvorcového (prípadne kruhového) tvaru so zaoblenými rohmi, ktoré sú vzájomne pospájané v celom FV module. Amorfné kremíkové články (a-Si) obsahujú veľmi tenkú vrstvu nekryštalického kremíka nadeponovaného na vhodnom substráte. Nevýhodou a-Si článkov je ich malá účinnosť. Ďalším problémom je starnutie vyvolané svetlom (Staeblerov-Wronského efekt). Avšak tieto články sú menej náchylné na zvýšenú prevádzkovú teplotu. Farba článkov sa môže pohybovať v rôznej škále farebných odtieňov podľa vlastností povrchu. Mikromorfné články (μ -Si) sú vytvorené kombináciou mikrokryštalického a amorfného kremíka v tandemových štruktúrach. Takýto článok dokáže lepšie využívať slnečné spektrum a oproti čistým amorfným článkom má skoro dvojnásobnú účinnosť a pomalšiu degradáciu. Ďalšie materiály použité na výrobu tenkovrstvových článkov môžu byť na chemickej báze CIS (meď-indium-diselenid), CIGS (meď-indium-gálium-diselenid), CdTe (telurid kademnatý). Osobitnú skupinu predstavujú DSSC články (*angl. dye sensitized solar cells, články scitlivené farbivom*), ktorých technológia spočíva v použití špeciálnej zmesi farbív na báze TiO_2 (oxid titaničitý) [17]. Taktiež špeciálnu kategóriu predstavuje tzv. viacprechodový (tandemový) solárny článok (*angl. multijunction solar cell – MJSC*), ktorý pozostáva z niekoľkých jednotlivých FV článkov (podčlánkov) naskladaných dohromady a zapojených do série, aby sa dosiahol vyšší výkon kombináciou ich rôznych citlivostí na rôznu vlnovú dĺžku slnečného žiarenia. MJSC sa väčšinou používajú v koncentrovaných FV systémoch. Základne účinnosti najviac používaných FV článkov sú uvedené v Tab. 3.1. Samotný vývoj účinnosti jednotlivých typov FV článkov od roku 1976 vedie NREL (National Renewable Energy Laboratory) v USA, kde sú uvedené ich jednotlivé účinnosti (Obr. 3.5), ktoré sú potvrdené nezávislými, uznávanými testovacími laboratóriami – napr. NREL, AIST, JRC-ESTI a Fraunhofer-ISE.



Obr. 3.4 Jednotlivé typy FV článkov.

Tab. 3.1 Účinnosť jednotlivých vybraných typov FV článkov

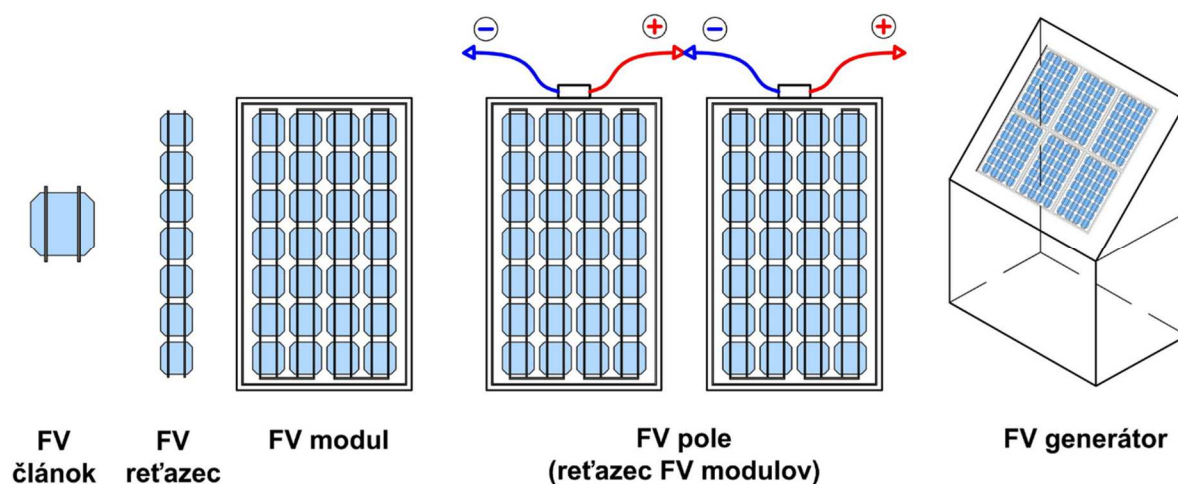
Typ FV článku		Účinnosť [%]	Teplotný koeficient [%/°C]	P _{max} (na 1 m ²) [W]	Potrebná plocha P _{max} = 1 kW [m ²]	
Prvá generácia		Monokryštalicový	18 – 22	-0,3 – -0,4	300 – 400	4,5 – 5,6
		Polykryštalicový	15 – 18	-0,4 – -0,5	250 – 350	5,6 – 6,7
Druhá generácia		Tenkovrstvový				
		a-Si	6 – 10	-0,3 – -0,4	20 – 80	10,0 – 16,7
		CdTe	10 – 18	-0,2 – -0,3	80 – 150	5,6 – 10,0
		CIGS	12 – 20	-0,3 – -0,4	150 – 200	5,0 – 8,3
Tretia generácia		DSSC	7 – 10	-0,3 – -0,4	0,1 – 1	10 – 14,29
		Perovskitové	15 – 25 (lab)	-0,2 – -0,3	200	4,0 – 6,7
		Organické	10 – 17	-0,2 – -0,4	50 – 100	5,9 – 10,0
		Kvantové	16 – 20	-0,2 – -0,4	500 – 1000	5,0 – 6,3
		Koncentrátory	30 – 35	-0,2 – -0,4	500 – 1500	2,9 – 3,3



Obr. 3.5 Postupný vývoj jednotlivých fotovoltaických technológií vo svete [18]

3.3 Elektrické zapojenie FV systémov

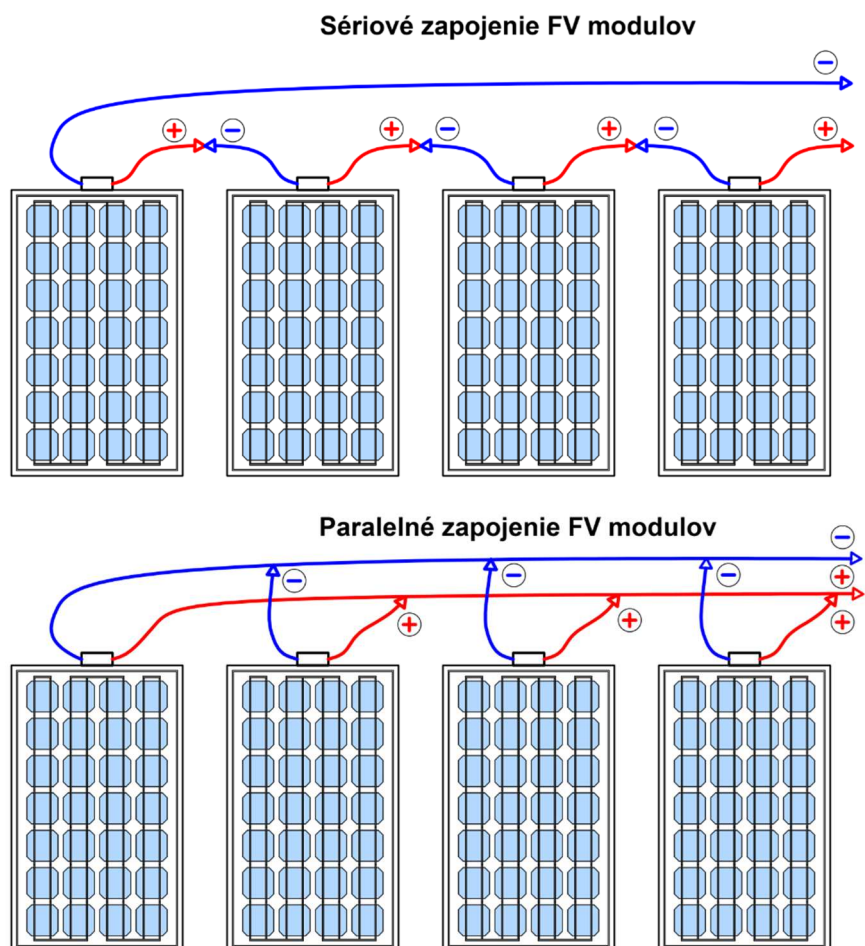
Výroba kryštálických FV modulov sa začína elektrickým zapojením niekoľkých FV článkov, čím sa vytvorí tzv. reťazec článkov (string). Obr. 3.6 zobrazuje hlavné kroky od FV článku k modulu až po systém FV generátora.



Obr. 3.6 Hierarchia tvorby FV systémov

Jednotlivé reťazce FV modulov sa potom vzájomne zapoja buď do série, alebo paralelne (Obr. 3.7). Sériové zapojenie je charakteristické tým, že záporný pól prvého FV modulu je priamo spojený s kladným pólom nasledujúceho FV modulu. Pri takomto zapojení sa kumuluje elektrické napätie a veľkosť pretekajúceho elektrického prúdu je konštantná. Súčasťou FV modulu je aj tzv. obtoková „bypass“ dióda, ktorá zabezpečuje ochranu FV modulu pred poškodením v dôsledku zvýšenej teploty FV modulu. Predmetné zvýšenie teploty v zapojenom sériovom reťazci je hlavne z dôvodu čiastočného alebo úplného zatienenia FV modulu, kedy sa zo zatieneného modulu stáva rezistor s elektrickým odporom, ktorý spôsobí lokálne zvýšenie teploty „hot-spot“. Obtoková dióda tento problém vyrieši prostredníctvom premostenia zatienenej časti FV modulov. Prúd z FV generátora následne smeruje do striedača (invertor), ktorý transformuje jednosmerný elektrický prúd na striedavý elektrický prúd, nakoľko značná časť elektrických spotrebičov využíva striedavý prúd, ako aj centrálna elektrizačná a prenosová sústava na Slovensku operuje na striedavom elektrickom prúde (230 V, 50 Hz). Výhodou sériového zapojenia je aj úspora kabeláže a konektorov. Pri paralelnom zapojení sú všetky FV moduly pripojené k jednej zbernici, pričom všetky kladné a záporne póly sú k nej vedené oddelene. Elektrické napätie v FV reťazci zodpovedá napätiu FV modulu, pričom celkový elektrický prúd sa rovná súčtu jednotlivých prúdov všetkých FV modulov v paralelných reťazcoch. Samotný elektrický výkon je zvyčajne vyšší ako pri sériovom zapojení, avšak

vzhľadom na dlhšie káblové vedenie je potrebné uvažovať so stratami na vedení, prípadne zväčšiť prierez kábla. Pri paralelnom zapojení nevzniká problém s tienením a potrebou integrácie obtokových diód. Taktiež je možné zapojenie v kombinovanom sériovo-paralelnom režime.

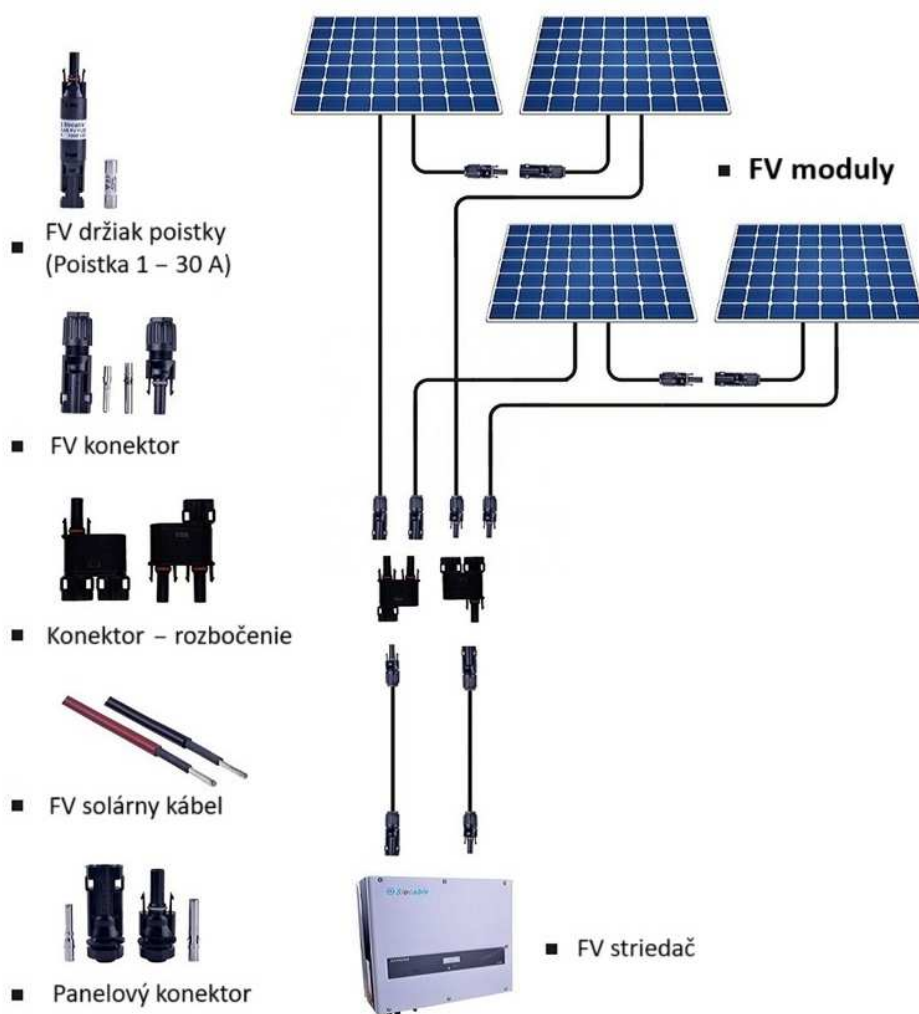


Obr. 3.7 Typy vzájomného elektrického zapojenia FV modulov

Vzájomne prepojenie FV modulov je realizované prostredníctvom špeciálnej kabeláže, tzv. solárne káble certifikované na použitie v rámci FV systémov. Tieto káble majú zásuvné spojky, ktoré chránia systém proti prepólovaniu (Obr. 3.8), ako aj rozbočovacie konektory pre zapojenie dvoch paralelných sústav do FV striedača elektrického prúdu (Obr. 3.9). Norma STN 33 2000-7-712: 2022 [19] určuje požiadavky na elektrické inštalácie FV zdroja určeného na napájanie celej inštalácie alebo jej časti a na dodávku elektriny do verejnej alebo miestnej distribučnej siete. FV systém obsahuje taktiež aj nadprúdové ochranné a odpojovacie zariadenia zväčša umiestnené v rozvodnej skrini (Obr. 3.10), ktorá slúži aj na pripojenie všetkých podružných FV modulov a FV polí v závislosti od ich počtu a schémy zapojenia.



Obr. 3.8 Káblové konektory solárnych káblov FV modulov [20]



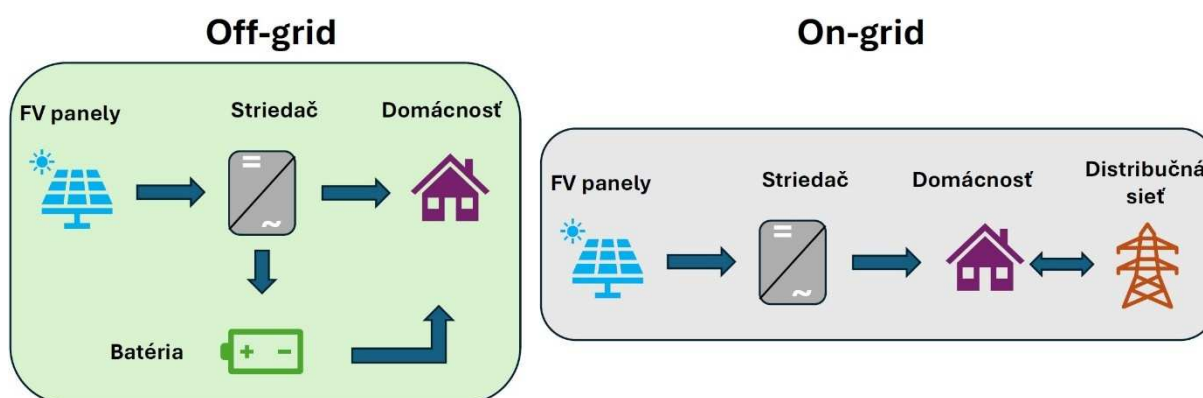
Obr. 3.9 Diagram elektrického zapojenia FV modulov [21]



Obr. 3.10 Rozvodná skriňa na použitie pre fotovoltické systémy [22]

3.4 Typy fotovoltických systémov

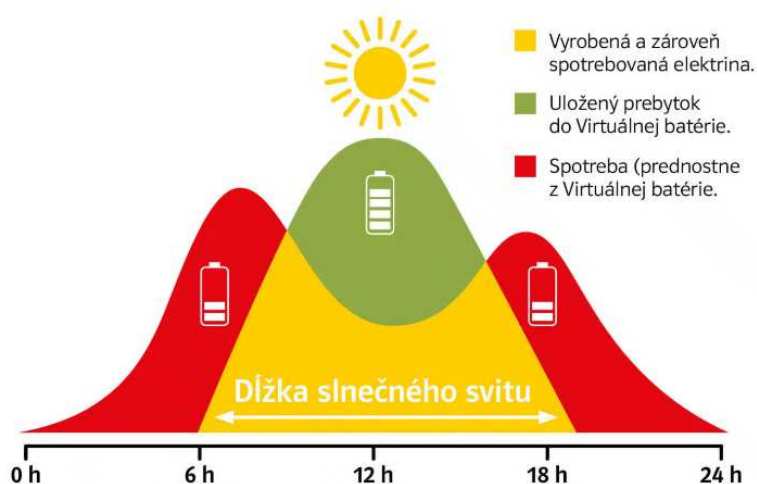
Fotovoltické systémy možno z hľadiska produkcie a usmernenia toku elektrickej energie rozdeliť na systémy zapojené do centrálnej elektrifikačnej sústavy (on-grid) a na ostrovné systémy (off-grid) (Obr. 3.11). V systéme on-grid slúži centrálna sústava ako ideálny úložný prvok a zaisťuje spoľahlivosť systému. Samotné vytvorenie systému si vyžaduje aplikáciu striadača (invertora) pre konvertovanie jednosmerného elektrického prúdu vyprodukovaného prostredníctvom FV panelu do elektrickej siete so striedavým prúdom na úrovni sieťového napätia. Off-grid systémy vyžadujú akumulátor (batéria), ktorý slúži ako vyrovnávajúca pamäť medzi kolísavým výkonom generovaným FV článkami a záťažou. Na zabezpečenie nepretržitého napájania aj v extrémnych podmienkach je často inštalovaný aj záložný generátor.



Obr. 3.11 Typy fotovoltických systémov

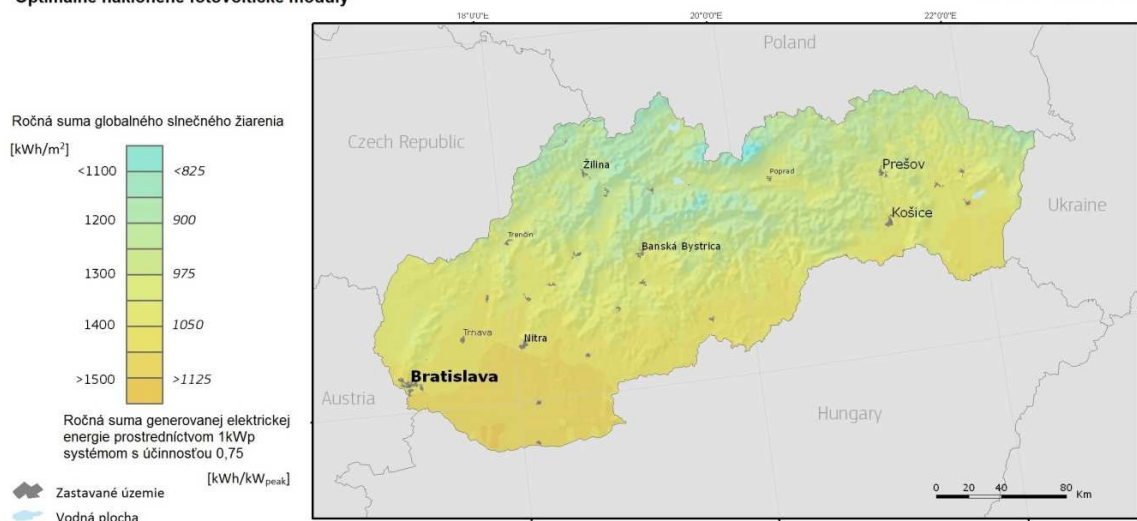
V súčasnosti predstavujú zapojenia on-grid 90 % z celkových fotovoltických inštalácií vo svete a s prognózami do budúcnosti tento podiel stále narastá. Dôvodom je aj dotovanie štátnymi inštitúciami za vyprodukovanú jednotku energie z obnoviteľných zdrojov, čo vo svojej

podstate slúži ako podporný nástroj pre užívateľa. Na Slovensku funguje špecifický systém výkupu elektriny vyrobenej z OZE za vopred definovanú cenu počas určitého garantovaného obdobia [23]. Podľa zbierky zákonov SR č. 18/2017 Z. z. [24] sa cena elektriny vyrobenej z obnoviteľných zdrojov energie v zariadení výrobcu elektriny uvedeného do prevádzky od 1. januára 2017 do 31. decembra 2019 určovala priamym určením pevnej ceny takto: zo slnečnej energie s celkovým inštalovaným výkonom zariadenia výrobcu elektriny do 30 kW, ktoré je umiestnené na strešnej konštrukcii alebo obvodovom plášti jednej budovy spojenej so zemou pevným základom – 84,98 €/MWh [25]. V súčasnosti sa zväčša uplatňuje princíp tzv. virtuálnej batérie, kde sa nepracuje s fyzickým systémom ale inteligentným systémom, ktorý umožňuje využívať prebytky vyprodukovanej elektrickej energie z FV panelov, pričom samotné podmienky sú určené konkrétnym dodávateľom elektrickej energie. FV panely vyprodukujú najviac elektrickej energie počas slnečného dňa, keď je väčšinou minimálna spotreba v rodinných domoch a práve virtuálna batéria poskytuje elektrickú energiu aj v iných intervaloch počas dňa (Obr. 3.12).



Obr. 3.12 Režim virtuálnej batérie počas dňa [26]

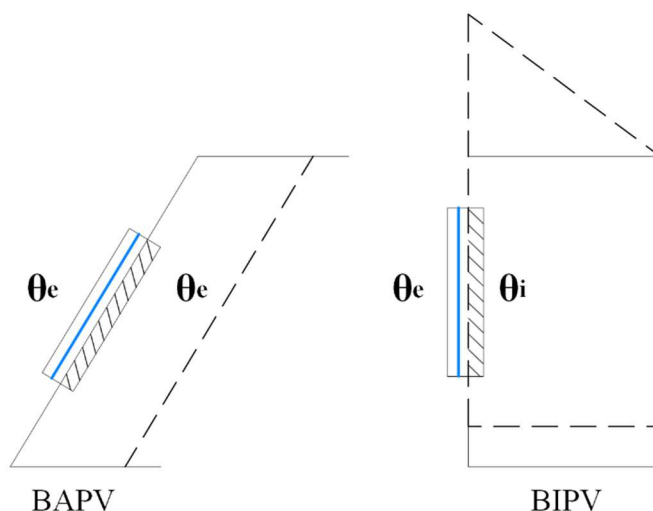
Slovensko má pomerne priaznivé klimatické podmienky (kontinentálna klimatická oblasť) pre využívanie slnečnej energie na FV aplikácie. Najviac slnečného žiarenia dopadá na južné a juhozápadné regióny, najmenej v severných oblastiach (Orava a Kysuce), pričom rozdiel medzi týmito oblasťami v množstve dopadajúceho žiarenia je približne 15 % (Obr. 3.13). Pri jasnom a bezoblačnom počasí sú podmienky pre FV optimálne, avšak FV článok je účinný aj pri difúznom žiarení, ktoré prevláda v klimatických podmienkach Slovenska.



Obr. 3.13 Mapa výskytu globálneho slnečného žiarenia na území Slovenska [27]

3.5 Fotovoltika v budovách

Rozdelenie FV systémov je taktiež možné z hľadiska ich technologickej integrácie s budovou na dve skupiny: uložené (uchytené) fotovoltaické systémy, používaná skratka BAPV (*angl. Building Added Photovoltaic*) a integrované fotovoltaické systémy, používaná skratka BIPV (*angl. Building Integrated Photovoltaic*) (Obr. 3.14). Je možné ešte spomenúť jednu skupinu z hľadiska solárnych systémov, a to integrované solárne termálne kolektory BIST (*angl. building integrated solar thermal collectors*). V danom prípade sa pod pojmom integrácia rozumie vo všeobecnosti substitúcia tradičných stavebných elementov v obalových konštrukciách budov za fotovoltaické elementy.

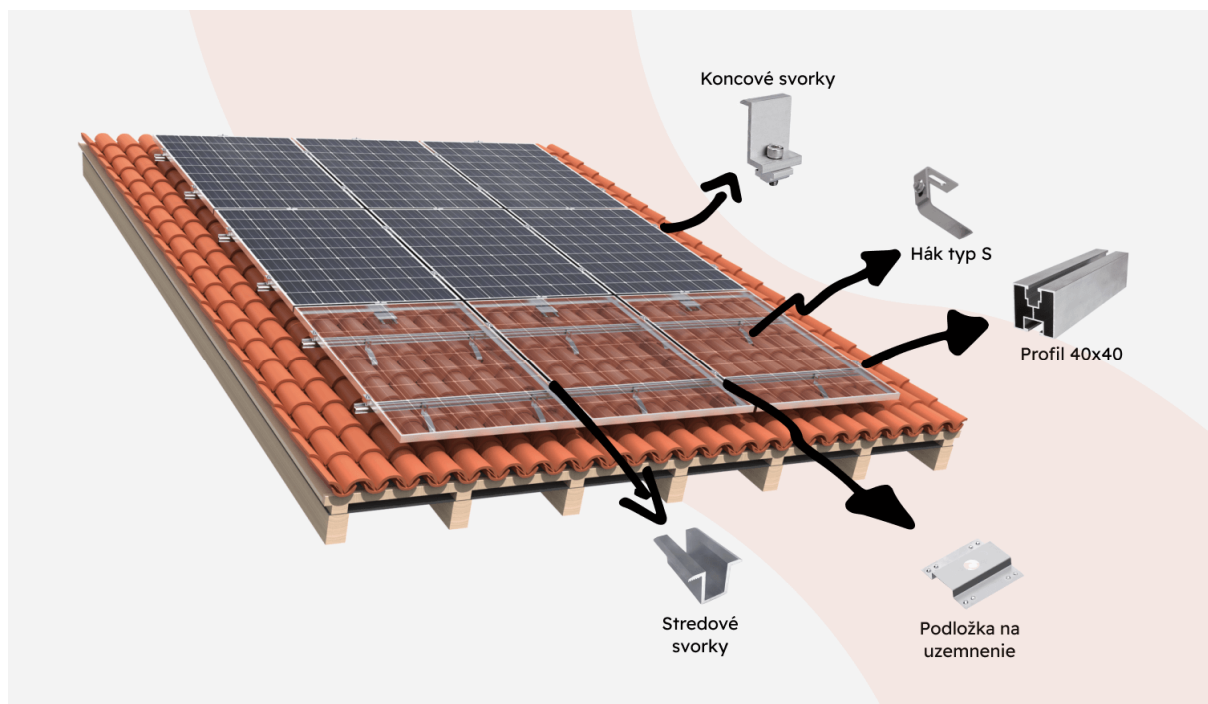


Obr. 3.14 Voľne položené FV a integrované FV do budovy

BAPV systémy sú inštalované priamo na už dokončenú obalovú konštrukciu budovy, pričom nezasahujú do jej funkčných vlastností (Obr. 3.15). Inštalujú sa do uchytávacieho rámu, ktorý je kotvený do nosnej vrstvy obalového plášťa budovy (Obr. 3.16). Systém kotvenia FV modulov musí byť navrhnutý tak, aby odolával klimatickému zaťaženiu. Hlavnou úlohou takého systému je iba produkcia elektrickej energie zo slnečného žiarenia.



Obr. 3.15 BAPV systém na streche rodinného domu [28]



Obr. 3.16 Uchytávacia konštrukcia BAPV systému na šikmej streche [29]

BIPV systémy vo svojej podstate tvoria integrálnu časť konštrukcie budovy. Fotovoltické materiály v danom prípade nahrádzajú tradičné stavebné materiály pri konštrukčnej tvorbe obalového plášťa budov a tvoria jeho funkčnú časť. Taktiež predstavujú architektonický

element, ktorý môže zlepšiť celkový vzhľad budovy a vytvoriť tak požadovaný vizuálny efekt. Tieto systémy už nielenže produkujú elektrickú energiu, ale aj predstavujú konštrukčný materiál, ktorý musí spĺňať určité požiadavky (tepelnotechnické, akustické, protipožiarne, aerodynamické a hydrodynamické, požiadavky na osvetlenie). Integrácia predstavuje výrazný krok k zlepšeniu celkovej energetickej účinnosti budov. Vo väčšine vedeckých článkov sa uvádza, že prvá integrovaná fotovoltaická fasáda bola zrealizovaná v nemeckom Aachene [30] (1991), kde FV elementy boli integrované do ľahkej obvodovej steny s izolačným zasklením (Obr. 3.17a).

Funkcie a požiadavky budovy v kontexte BIPV sú:

- mechanická tuhosť alebo štrukturálna integrita;
- primárna ochrana pred poveternostnými vplyvmi: dážď, sneh, vietor, krupobitie;
- úspora energie, ako je tienenie, denné osvetlenie, tepelná izolácia;
- protipožiarne ochrana;
- ochrana pred hlukom;
- oddelenie vnútorného a vonkajšieho prostredia;
- bezpečnosť.



a



b

Obr. 3.17 BIPV systémy integrované v obvodovom plášti budov: a – jeden z prvých BIPV obvodových plášťov v Európe (Aachen, Nemecko) [30], b – BIPV obvodový plášť v súčasnosti inštalovaný na Technickej univerzite Etelä-Kymenlaakso [31]

Vyhodnotenie rozdielnych typov BIPV systémov integrovaných v rozličných konštrukciách, môže vo všeobecnosti zahŕňať nasledujúce parametre [32]:

- účinnosť FV, $\eta = P_{max}/(G.A)$, kde P_{max} maximálny výkon [W] alebo Watt-peak [Wp], G je výkon slnečného žiarenia dopadajúceho na plochu [Wm^{-2}], A je povrchová plocha FV článku alebo modulu [m^2];
- napätie naprázdno (*angl. open circuit voltage*), U_{oc} [V];
- prúd na krátko (*angl. short circuit current*), I_{sc} [A];
- výkon v bode maxima (*angl. maximum power point*), $P_{max}=(U.I)_{max}$;
- faktor plnenia (*angl. fill factor*), $FF=P_{max}/(U_{oc}.I_{sc})=(U.I)_{max}/(U_{oc}.I_{sc})$;
- šírka zakázaného pásu polovodiča (*angl. band gap*), E_g ;
- kvantový výťažok (*angl. quantum yield*), $\Phi=\text{počet generovaných elektrónov/počet fotónov}$.

Tieto hodnoty sú získané výrobcom, ktorý používa štandardné testovacie podmienky (*angl. standard test conditions*) STC a tiež nominálnu hodnotu prevádzkovej teploty FV článku (*angl. nominal operating temperature*) NOCT, podľa Tab. 3.2. Hodnota AM (*angl. air mass*) určuje oslabenie slnečného žiarenia dlhým prechodom cez atmosféru, pričom dochádza aj k určitej zmene spektrálneho zloženia žiarenia (označenie dráhy slnečného žiarenia cez atmosféru zeme v porovnaní s najkratšou vzdialenosťou pri dopade kolmom na vodorovnú plochu na povrchu zeme) $AM=1/\cos\theta$, kde uhol θ je odklon oproti kolmici na vodorovnú rovinu zemského povrchu.

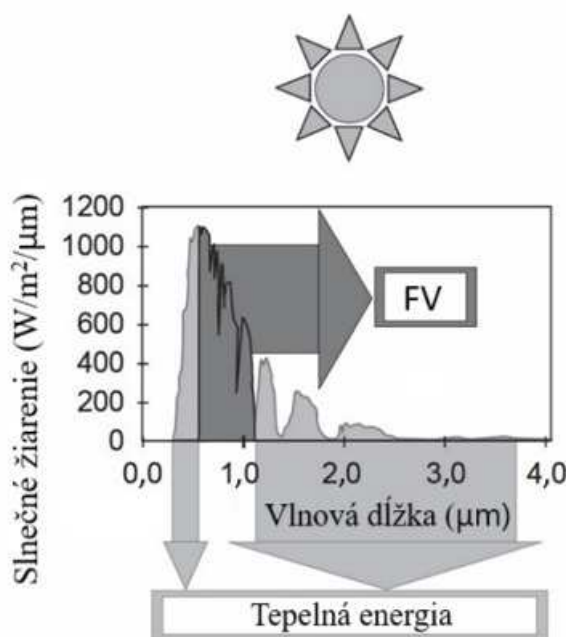
Tab. 3.2 Prehľad testovacích podmienok FV článkov, STC a NOCT

	Slnečné žiarenie [Wm^{-2}]	Teplota FV článku [$^{\circ}\text{C}$]	Vonkajšia teplota vzduchu [$^{\circ}\text{C}$]	Relatívna dĺžka slnečných lúčov pri prechode atmosférou	Rýchlosť vetra [m/s]
STC	1000	25	-	AM 1,5	-
NOCT	800	-	20	-	1

Dôležitý faktor, ktorý priamo ovplyvňuje účinnosť FV článkov, je ich prevádzková teplota, kde jej zvýšená hodnota má za následok niekoľko fyzikálnych vplyvov na samotný článok. Dobrý prehľad problematiky zameranej na vplyv prevádzkovej teploty FV a účinnosti uskutočnil Skoplaki a kol. [33], kde zosumarioval väčšinu výskumov v tejto problematike a navrhol aj rovnicu výpočtu daného koeficientu.

Celková plocha fasády v rámci plášťa budovy silne závisí od architektúry budovy a má potenciál na zber a využitie slnečného žiarenia. Bolo zistené, že z celkovej potenciálnej plochy BIPV na budovách, predstavujú podielovo strešné plochy 3/4 a fasádne plochy 1/4. Približne 15 % ~ 20 % z celkového potenciálu výroby elektriny pomocou FV možno pripísať fasádnym plochám [34]. Odhadovaný potenciál BIPV je 951 GWp v 27 krajinách v rámci EÚ a môže poskytnúť 840 TWh elektriny, čo je približne 22 % očakávaného celkového dopytu po elektrine v 27 krajinách v rámci EÚ v roku 2030 [35].

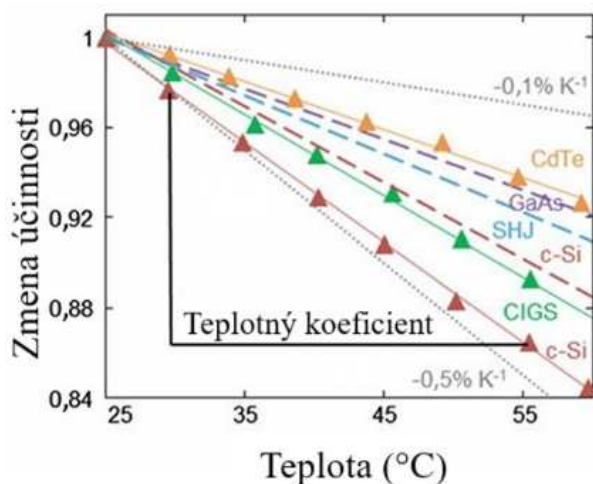
Treba vziať do úvahy, že veľká časť dopadajúceho slnečného žiarenia na FV povrch neprispieva k výrobe elektriny (približne 80 – 95 %), v závislosti od typu FV polovodičového materiálu a konštrukcie zapuzdrenia v rámci celého FV modulu. Slnečné žiarenie predstavuje slnečné spektrum rôznych vlnových dĺžok elektromagnetického žiarenia a účinnosť FV je v zásade závislá od vlnovej dĺžky v určitom rozsahu. Zvyšok slnečného spektra sa po dopade na FV článok premení na tepelnú energiu (Obr. 3.18).



Obr. 3.18 Rozdelenie slnečného spektra pre FV a tepelnú energiu [36]

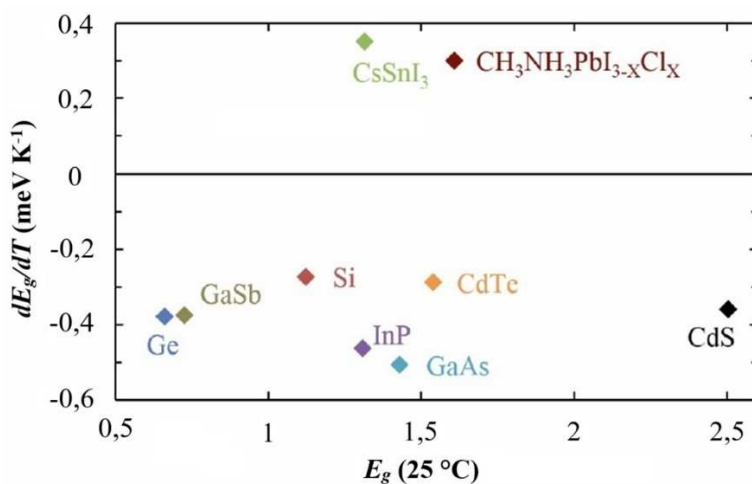
Premenená časť slnečného žiarenia na tepelnú energiu má významnú úlohu v účinnosti FV η_{pv} (zohrievanie FV článkov), pretože ovplyvňuje nielen elektrické prúdové a napäťové charakteristiky, ale aj celkovú životnosť (teplotou indukovaná degradácia) FV modulu. Typicky sa výstupný elektrický výkon FV systému zníži približne o 0,5 % pri každom zvýšení teploty FV článku o jeden stupeň Celzia, v závislosti od materiálovej charakteristiky polovodiča. Tento teplotný efekt je značne vyšší v systéme BIPV v porovnaní s klasickým systémom BAPV, najmä pre jeho nedostatočné možnosti chladenia po priamej integrácii do plášťa budovy (problém

tepelného napätia). V súčasnosti je na trhu dostupných veľa typov FV článkov s rôznymi tepelno-optickými a elektrickými parametrami. Každý z nich má svoju typickú funkciu prevádzkovej tepelno-elektrickej účinnosti definovanú teplotným koeficientom β_{pv} . Tento koeficient určuje znižovanie výkonu pri vysokých teplotách článku (Obr. 3.19).



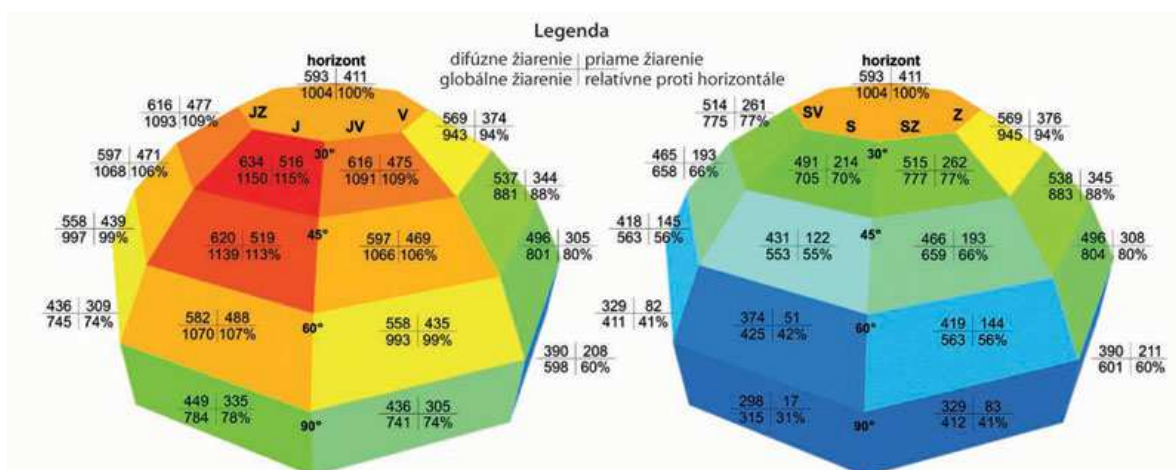
Obr. 3.19 Zmena účinnosti ako funkcia teploty FV článkov vyrobených z rôznych polovodičov [37]

Základné fyzikálne princípy FV polovodičového článku určujú, že ak sa teplota článku (presnejšie teplota p-n priechodu) zvýši, zúži sa energetický rozdiel medzi valenčným pásom a pásom vodivosti polovodiča – zakázané pásmo (E_g). Existuje však niekoľko výnimiek v perovskitových polovodičových zlúčeninách, ktoré majú nezvyčajné teplotné závislosti šírky zakázaného pásma. Šírka zakázaného pásma FV článkov sa väčšinou znižuje takmer lineárne v teplotnom rozsahu ich prevádzky, ale neexistuje všeobecný vzťah medzi šírkou zakázaného pásma a jeho teplotnou závislosťou (Obr. 3.20).



Obr. 3.20 Strmost' lineárnej aproximácie teplotnej závislosti zakázaného pásma FV článkov okolo 300 K [38]

V rámci umiestnenia FV panelov na budove je jedným zo skúmaných aspektov vzťah medzi účinnosťou a orientáciou/sklonom (Obr. 3.21). Optimálny sklon FV panelov na využitie maximálneho slnečného žiarenia je hlavne v spojitosti s polohou Slnka na oblohe, ktorá závisí od zemepisnej šírky a lokality. Orientácia plochy FV modulu ovplyvňuje množstvo prijatého slnečného žiarenia, a tým aj množstvo vyrobenej elektrickej energie. V našich zemepisných šírkach dostávajú FV panely orientované na juh najviac slnečnej energie počas dňa. Z tohto dôvodu, aby sa maximalizovala energia vyrobená počas roka, orientácia zariadenia by mala byť smerom na juh. Taktiež aj orientácia medzi juhozápadom a juhovýchodom určuje zaujímavú účinnosť so stratami nepresahujúcimi 10 % v porovnaní s južnou orientáciou (Obr. 3.22). Navyše FV panely orientované na východ zvyšujú produkciu energie v dopoludňajších hodinách, zatiaľ čo panely orientované na západ robia to isté v popoludňajších hodinách. Treba sa vyhnúť severnej orientácii panelov, kde na FV panely pôsobí iba difúzna, prípadne odrazená zložka slnečného žiarenia. Spravidla by sa moduly mali montovať s optimálnym sklonom (naklonením) medzi 20° a 50° (poloha Slnka na oblohe), v našich podmienkach pričom optimálny sklon závisí najmä od zemepisnej šírky miesta, ale aj od charakteru lokality.



Obr. 3.21 Účinnosť BIPV systémom z hľadiska ich umiestnenia na obalovom plášti budovy pri južnej orientácii (vľavo) a pri severnej orientácii (vpravo) [39]

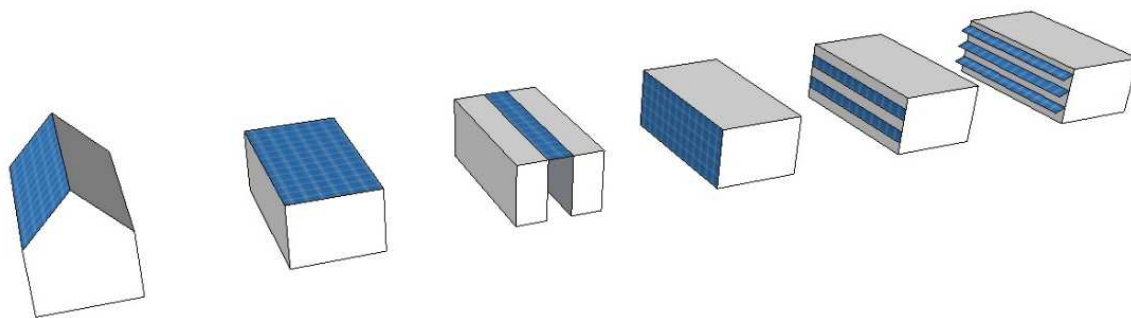
STANOVENIE EFEKTIVITY														
Náklon strechy	ZÁPAD					JUH					VÝCHOD			
	270 °	255 °	240 °	225 °	210 °	195 °	180 °	165 °	150 °	135 °	120 °	105 °	90 °	
	90 °	56	60	64	67	69	71	71	71	71	69	65	62	58
	80 °	63	68	72	75	77	79	80	80	79	77	74	69	65
	70 °	69	74	78	82	85	86	87	87	86	84	80	76	70
	60 °	74	79	84	87	90	91	93	93	92	89	86	81	76
	50 °	78	84	88	92	95	96	97	97	96	93	89	85	80
	40 °	82	86	90	95	97	99	100	99	98	96	92	88	84
	30 °	86	89	93	96	98	99	100	100	98	96	94	90	86
	20 °	87	90	93	96	97	98	98	98	97	97	94	91	88
	10 °	89	91	92	94	95	95	96	95	95	94	93	91	90
	0 °	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90

Obr. 3.22 Zmena vo výkone FV panelu v závislosti od orientácie [40]

4 Integrované fotovoltaické systémy (BIPV)

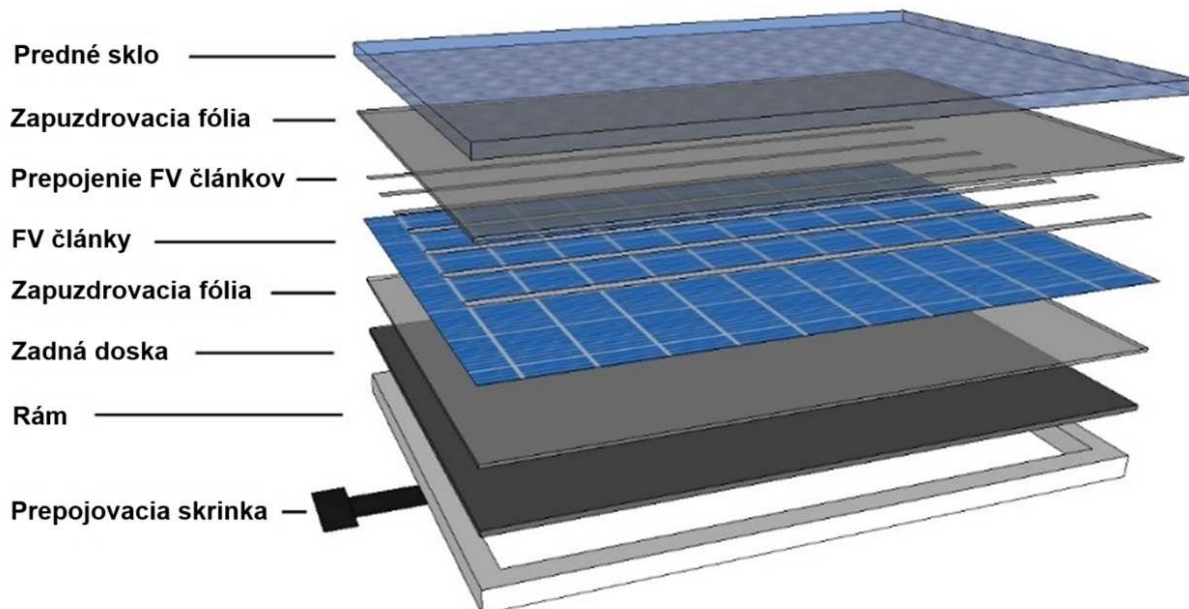
Fotovoltaika integrovaná do budov (BIPV) predstavuje koncept včlenenia fotovoltaických prvkov do konštrukcie budovy, kde sa spája architektonický dizajn, funkčnosť a ekonomický prínos obnoviteľnej energie. FV materiály v systéme BIPV nahradzujú tradičné stavebné materiály pri konštrukčnej tvorbe obalového plášťa budov a tvoria jeho funkčnú časť. Účinnosť FV komponentov pri ich integrácii do budov závisí od viacerých faktorov, ako sú prevádzková teplota, slnečné žiarenie, tieňové efekty, spektrálne zmeny a optické straty. Ak sú moduly inštalované v tesnom kontakte s inými stavebnými materiálmi, ako sú steny alebo strechy, môže to spôsobiť ďalšie zvýšenie prevádzkovej teploty pre obmedzenú cirkuláciu vzduchu. Solárne fotovoltaické systémy by mali byť kompatibilné s existujúcimi izolačnými materiálmi budovy. Ak solárny modul nahrádza stavebný prvok, mal by byť schopný zachovať integritu konštrukcie aj v prípade jeho poškodenia alebo zníženia energetického výkonu. Pri plánovaní integrácie je dôležité zabezpečiť, aby bolo možné jednotlivé prvky v prípade potreby vymeniť bez poškodenia budovy. Naopak, ak výmena nie je možná, môže to ovplyvniť celkový energetický výkon budovy, čím sa zruší účel inštalácie solárnych fotovoltaických produktov ako súčasti budovy. Tento faktor je obzvlášť dôležitý pri inštalácii fasád, okien alebo zábradlí.

Z hľadiska architektúry je možné zvýšiť celkovú estetiku budovy a vytvoriť tak požadovaný vizuálny efekt. BIPV systémy poskytujú niekoľko možností pre inovatívny architektonický návrh, môžu byť použité vo fasádach, strechách, tieniacich systémoch, taktiež vo forme polotransparentných elementov v okenných konštrukciách, v strešných škridlách, v strešných hydroizolačných systémoch (Obr. 4.1).



Obr. 4.1 Integrácia BIPV systémov do obalových konštrukcií budov. Zľava doprava: šikmá strecha, plochá strecha, strešný svetlák, fasáda, okenná konštrukcia, tieniace konštrukcie.

BIPV moduly osadené do konštrukcie budovy pozostávajú z jednotlivých FV článkov (navzájom elektricky spojené), ktoré sú zapuzdrované vo fólií (EVA, PVB) čím sú chránené pred poveternostnými vplyvmi a elektricky vzájomne izolované. Následne sú osadené medzi prednú sklenenú dosku a zadnú dosku, ktorá môže byť zo skla, umelohmotného kompozitu alebo z iného nosného materiálu (Obr. 4.2). Takto je vytvorený jeden modul s určitými rozmermi podľa konštrukčných požiadaviek, ktorý je schopný vyprodukovať určité množstvo elektrickej energie. Jednotlivé moduly sa medzi sebou elektricky prepájajú (paralelne, sériovo).



Obr. 4.2 Štruktúra FV modulu zloženého z kryštalickej článkov

Stavebná integrácia FV musí vždy spĺňať dve rôzne schémy normalizácie a regulácie. Prvá schéma sa týka požiadaviek stavebného priemyslu, často regulovaných miestnymi stavebnými predpismi a medzinárodnými normami (ISO); druhý – je v súlade s elektrotechnickým

priemyslom a medzinárodnými (IEC) normami, ako aj záväznými miestnymi predpismi. Všetky fotovoltické produkty musia byť schválené skúšobnými certifikačnými orgánmi a laboratóriami podľa aktuálnych medzinárodných noriem. Keďže fotovoltické produkty navrhnuté špeciálne na integráciu do budov stále predstavujú čiastočnú medzeru na trhu, existuje obmedzené množstvo harmonizovaných noriem pre skutočné testovanie týchto produktov. Medzinárodná elektrotechnická komisia (International Electrotechnical Commission – IEC) vyvinula za posledné obdobie súbor noriem pre fotovoltické (FV) moduly a systémy na charakterizáciu a posúdenie ich elektrického výkonu. Okrem toho sa na moduly a systémy BIPV ako stavebné prvky vzťahujú mnohé normy ISO (International Organization for Standardization). Nedávno publikovaná norma IEC 63092-1: Fotovoltika v budovách [41] podľa vzoru európskej normy EN 50583 odkazuje na normy IEC a ISO týkajúce sa elektrotechnických a stavebných požiadaviek. Norma EN 50583-1 Photovoltaics in buildings - Part 1: BIPV modules [42], platí pre fotovoltické moduly používané ako stavebné výrobky. Zameriava sa na vlastnosti týchto fotovoltických modulov, relevantné pre základné stavebné požiadavky špecifikované v európskom nariadení o stavebných výrobkoch CPR 305/2011 [43] a príslušné elektrotechnické požiadavky, ako sú uvedené v smernici o nízkom napätí 2006/95/ES [44], alebo normách CENELEC. EN 50583 rozlišuje medzi modulmi (časť 1) [42] a systémami (časť 2) [45] tým, že poskytuje definíciu pre BIPV moduly používané ako stavebné výrobky a definíciu pre BIPV systémy (napr. BIPV závesové systémy), ktoré sú integrované do budov. Odborníci na BIPV z Task15 IEA-PVPS však uznali, že nie všetky testovacie postupy zahrnuté v týchto normách sú dostatočne prispôsobené na riešenie špecifických prvkov BIPV. Ich Medzinárodná správa [46] obsahuje podrobnú analýzu požiadaviek, špecifikácií a nariadení relevantných pre vývoj noriem, ktoré sa zaoberajú otázkami výkonnosti a bezpečnosti BIPV.

Fotovoltika integrovaná do budovy sa v značnej miere zohľadňuje aj pri hodnotení energetickej a udržateľnej kvality budovy prostredníctvom certifikačných systémov budov, ako sú napr. BREEAM, LEED, DGNB a podobne (Obr. 4.3). Certifikačné systémy predstavujú dobrovoľné environmentálne programy hodnotenia a označovania GREEN BUILDINGS. Nie sú to povinné schémy na rozdiel od národných kódexov alebo noriem, ale určujú značky udržateľnosti. Niektoré verejné organizácie povinne určujú certifikačné schémy pre svoje budovy. Väčšina certifikačných schém má kľúčové kategórie (energia, voda a kvalita vnútorného prostredia) na hodnotenie budovy. V procese certifikácie budov však neexistuje jediný prístup, aj keď sa zdá, že existuje zhoda v potrebe poskytnúť hodnotenie životného cyklu stavebných materiálov.



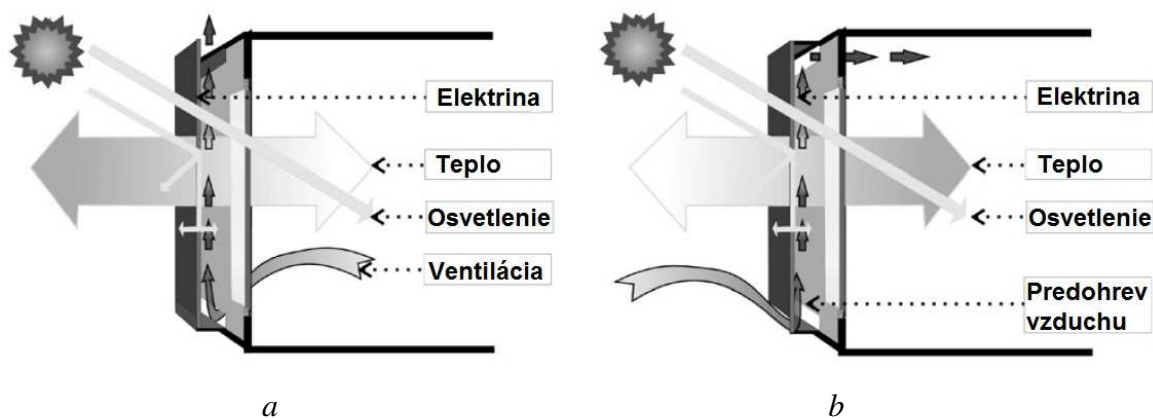
Obr. 4.3 Certifikačné systémy vo svete [47]

4.1 BIPV fasády

S rastúcou výškou budovy sa zvyšuje relatívny podiel fasádnych plôch v porovnaní s plochami striech. Prevládajúcim trendom vo fasádnej technike je jej narastajúca komplexnosť. Rozsah možností sa neustále rozširuje a technické riešenia sa stávajú ukazovateľmi najmodernejšieho stavu, kde stále viac a viac moderných fasád sa vyvíja s cieľom zvýšiť úroveň vnútorného komfortu budovy. Postupne sa objavuje termín „adaptívna fasáda“, ktorá naznačuje schopnosť obvodových plášťov meniť svoje tvarové a fyzikálne vlastnosti v závislosti od dynamickej zmeny klímy a zmeny nárokov užívateľa v interiéri budovy. Systém prispôsobenia obvodového plášťa možno porovnať aj s modifikáciou ľudského správania sa, obliekanie sa v závislosti od zmeny ročného obdobia. Takéto typy konceptov sa samozrejme nemôžu zaobísť bez solárnych systémov, ktoré by priamo produkovali energiu potrebnú na užívanie budovy. Nezatienená plocha povrchu fasády je vhodná pre integráciu FV systémov, aj keď ide o vertikálnu plochu, ktorá v porovnaní so šikmou plochou na streche budovy má o niečo menší energetický zisk, ale stále ma určitý potenciál, ktorý je potrebné využiť. FV moduly môžu byť integrované v rámci systému obvodového plášťa čiastočne, keď len nahradia finálnu exteriérovú vrstvu (prevetrávaný obklad), alebo nahradia celý systém (ľahké obvodové plášte). Jednotlivé fasádne prvky ako tieniace zariadenia, vonkajšie parapety a balkónové zábradlia predstavujú takisto možnosť integrácie FV modulov. BIPV systém v sebe zahŕňa nielen samotný FV modul, ale aj dodatočné potrebné vybavenie ako je kabeláž a jej následné napojenie na potrebné elektrotechnické vybavenie, ktoré musí byť uvažované pri tvorbe detailov, z hľadiska ľahkej dostupnosti kvôli údržbe.

4.1.1 Prevetrávané BIPV fasády

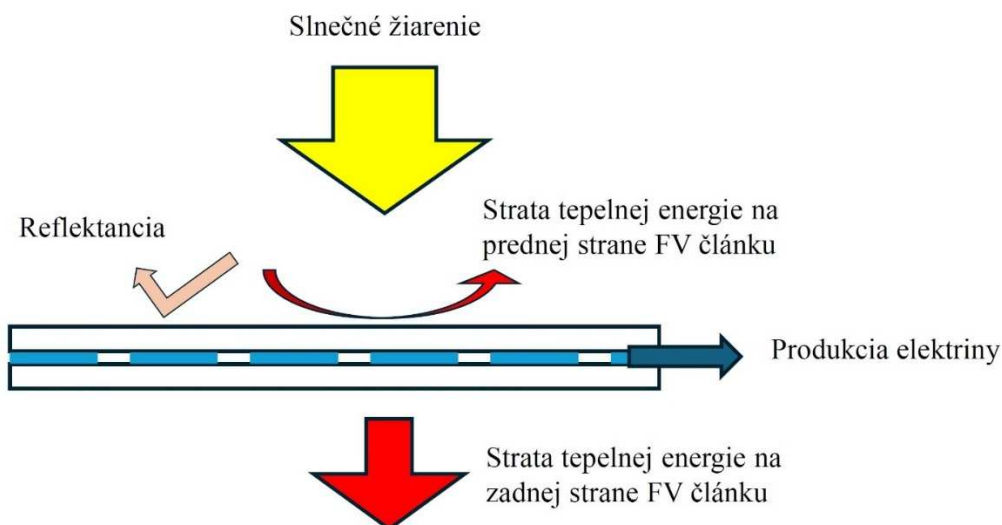
Pri prevetrávaných dvojitéch obvodových plášťoch sa za posledných 15 rokov vytvára priestor pre integráciu FV elementov. Vo svojej podstate predstavujú konštrukciu zloženú z dvoch paralelných plošných konštrukcií oddelených medzerou, v ktorej nastáva pohyb vzduchu. Väčšinou sa takýto typ obvodového plášťa využíva pri viacposchodových budovách, keď zaťaženie na budovu stúpa po výške. Najbežnejšie sa pohyb vzduchu zabezpečuje zakomponovaním vetracích štrbín umiestnených na spodnej a vrchnej časti obvodového plášťa, alebo jeho fragmentu. Samotné prúdenie vzduchu sa vytvára prirodzene v dôsledku rozdielov tlakov vzduchu komínovým efektom (vyvolané slnečným žiarením) a účinku vetra, alebo nútene s použitím integrovaných vetracích zariadení. Fasádna medzera môže pracovať buď ako zóna tepelného nárazníka, tiež ako vetrací kanál, alebo kombinácia oboch princípov. Sezónna konfigurácia takejto fasády môže predstavovať zariadenie na predohrev vonkajšieho vzduchu počas zimného obdobia (Obr. 4.4b) a prirodzený ventilačný systém v letnom období (Obr. 4.4a).



Obr. 4.4 Režimy prevetrávanej FV fasády v závislosti od ročného obdobia: a – letné obdobie, b – zimné obdobie [48]

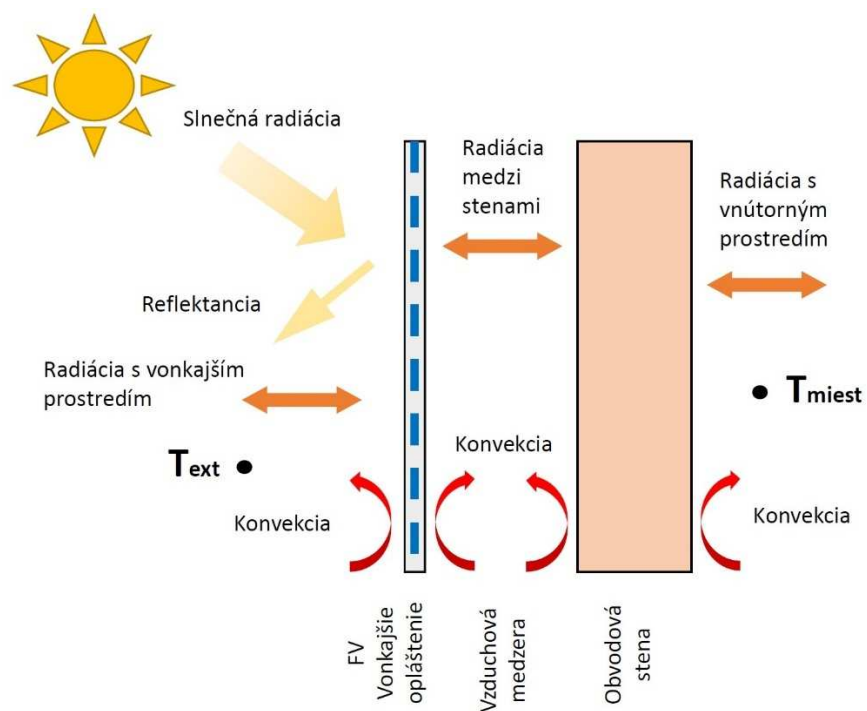
Jednotlivé komponenty dvojitého BIPV obvodového plášťa interagujú s budovou viacerými spôsobmi. Ide o veľmi komplexný problém, keď je potrebné uvažovať s tepelnými a elektrickými procesmi na úrovni komponentov obvodového plášťa. Slnečné žiarenie (priame, difúzne) sa po dopade na finálnu exteriérovú FV vrstvu obvodového plášťa sčasti okamžite odrazí zrkadlovo a difúzne (v závislosti od povrchových vlastností), zvyšná časť sa absorbuje (Obr. 4.5). Na produkciu elektrickej energie pomocou FV sa spotrebuje iba cca 15 % (v závislosti od typu FV článku) z celkového pohlteneho slnečného žiarenia, zvyšná časť sa zmení na teplo na oboch stranách FV článku, následkom čoho nastáva rozdielna tepelná výmena

v FV obvodovom plášti, v porovnaní s klasickým transparentným/polotransparentným dvojitém obvodových plášťom.

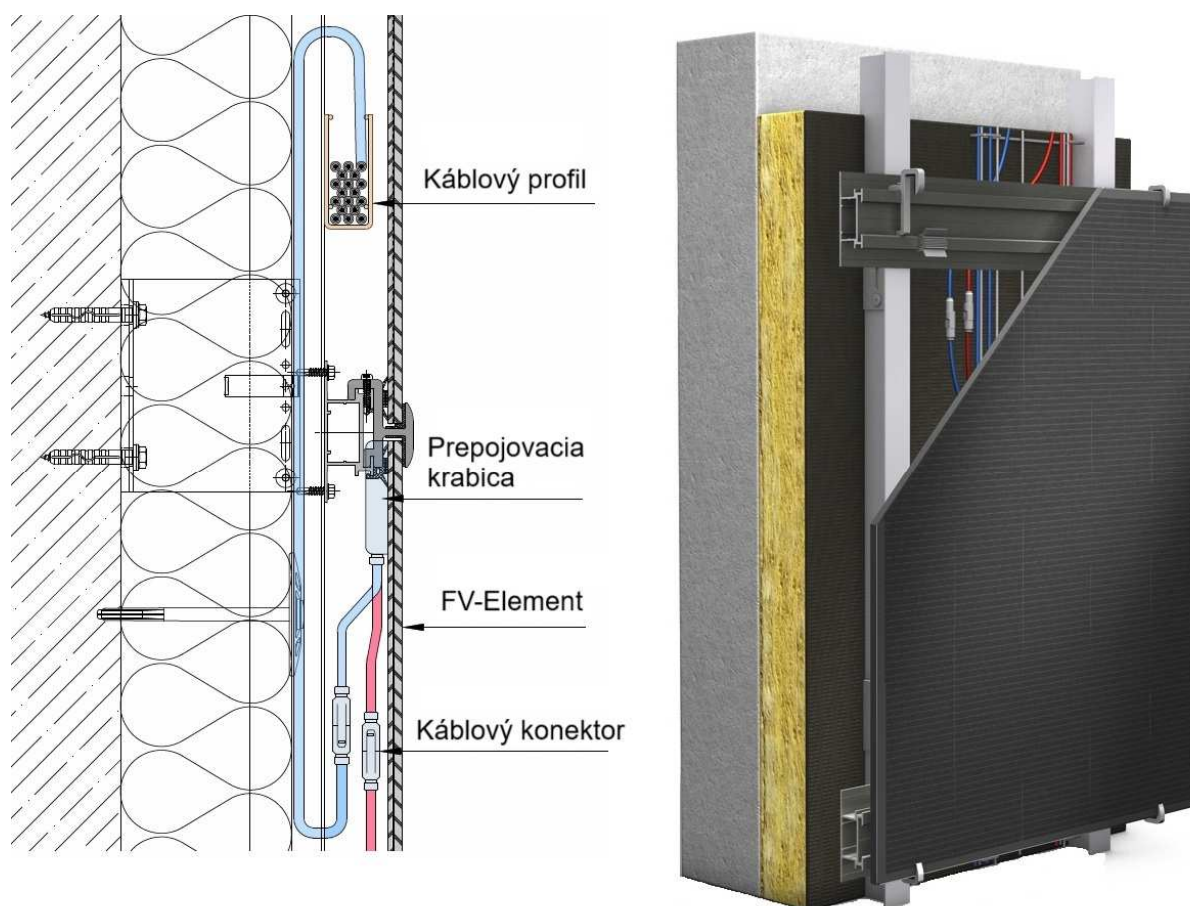


Obr. 4.5 Schematický princíp tokov energie na FV článku s dôrazom na veľkú časť energie v podobe tepla

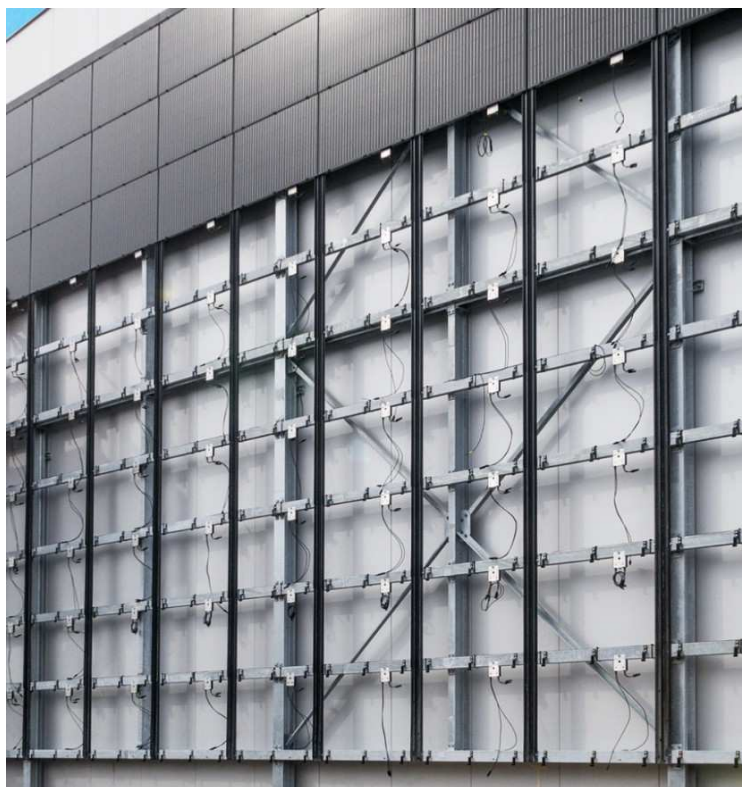
Integrácia fotovoltických systémov do dvojitého obvodového plášťa ako exteriérová konštrukcia (Obr. 4.7, 4.8) je vo svojej podstate výhodnejšia v porovnaní s integráciou do jednoplášťovej obvodovej konštrukcie. Z výraznej časti sa redukuje problém prehrievania FV článkov v dôsledku prúdenia vzduchu vo fasádnej medzere, keď sa tepelná energia vyprodukovaná na FV článku fyzikálne odoberá štyrmi spôsobmi: radiačnou výmenou s vonkajším prostredím, konvekciou s vonkajším vzduchom, radiačnou výmenou s tuhými povrchmi vo fasádnej medzere a konvekciou s prúdiacim vzduchom v medzere (Obr. 4.6). Následne je FV článok ochladzovaný a udržiava si optimálnu teplotu, pri ktorej je jeho účinnosť produkcie elektrickej energie optimálna a zároveň sa neskracuje jeho celková životnosť. Vzhľadom na to je potrebné brať väčší ohľad na mechanizmus prenosu tepla vo fasádnej medzere.



Obr. 4.6 Zjednodušená schéma prenosu tepelnej energie v dvojitom BIPV obvodovom plášti



Obr. 4.7 Konštrukcia prevetrávanej fasády s FV obkladom: skladba konštrukcie (vľavo), axonometria konštrukcie (vpravo) [49]



Obr. 4.8 Montáž integrovaného BIPV obkladu [50]

Dispozícia a umiestnenie netransparentných fotovoltických článkov má významnú úlohu v stavebnej tepelnej technike obvodových plášťov, nakoľko netransparentná fasáda pracuje v inom režime v porovnaní s transparentnými dvojitými fasádami, kde nastáva skleníkový efekt. Účinnosť BIPV obvodového plášťa (PVEF) (*angl. the effectiveness of a PV façade*) možno definovať ako pomer súčtu úspory elektrickej energie na osvetlenie interiéru a elektrickej energie vyprodukovanej FV článkami k súčtu spotreby energie na vykurovanie a chladenie budovy [51]. Využívanie denného osvetlenia cez daný obvodový plášť nám umožňuje redukovať potrebu energie na osvetlenie (umelé, združené) vnútorných priestorov budovy. Úspora osvetlenia spočíva predovšetkým v dispozičnom rozložení jednotlivých FV článkov na exteriérovej časti. Spotreba energie na vykurovanie a chladenie môže slúžiť ako indikátor, ktorý reprezentuje pohyb vzduchu a prechod tepla v rámci BIPV obvodového plášťa.

$$PVEF = \frac{L_{\text{saving}} + E_{\text{output}}}{H_{\text{energy}} + C_{\text{energy}}} \quad (4)$$

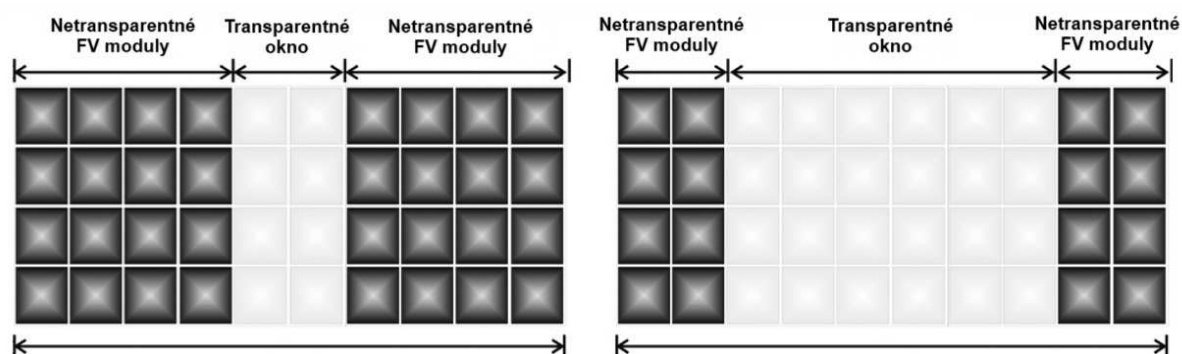
kde:

L_{saving} – úspora energie na osvetlenie využitím denného osvetlenia cez obvodový plášť
[kWh]

E_{output} – elektrická energia vyprodukovaná FV článkami [kWh]

H_{energy} – spotreba energie na vykurovanie [kWh]

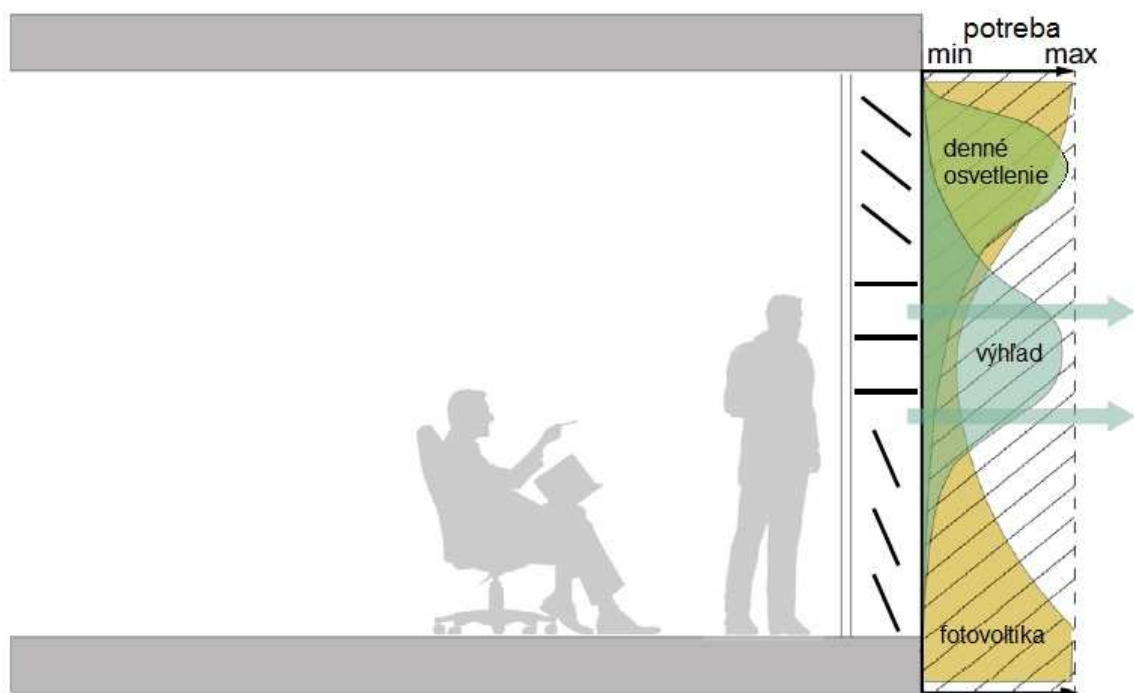
C_{energy} – spotreba energie na chladenie [kWh]



Obr. 4.9 Možnosti rozmiestnenia FV modulov na fasáde k transparentným konštrukciám [51]

Optimálny pomer transparentných a netransparentných (FV) plôch WR (window ratio) pri prevetrávanom BIPV obvodovom plášti (Obr. 4.9) zohráva podstatnú úlohu (tento pomer závisí od stavebno-fyzikálnych vlastností zasklenia), pretože sa od neho odvíja celková energetická náročnosť interiéru. Dôležitý faktor predstavuje aj samotná hĺbka miestnosti od ktorej sa odvíja aj potrebné osvetlenie, zemepisná šírka a charakter lokality kde je umiestnený objekt budovy.

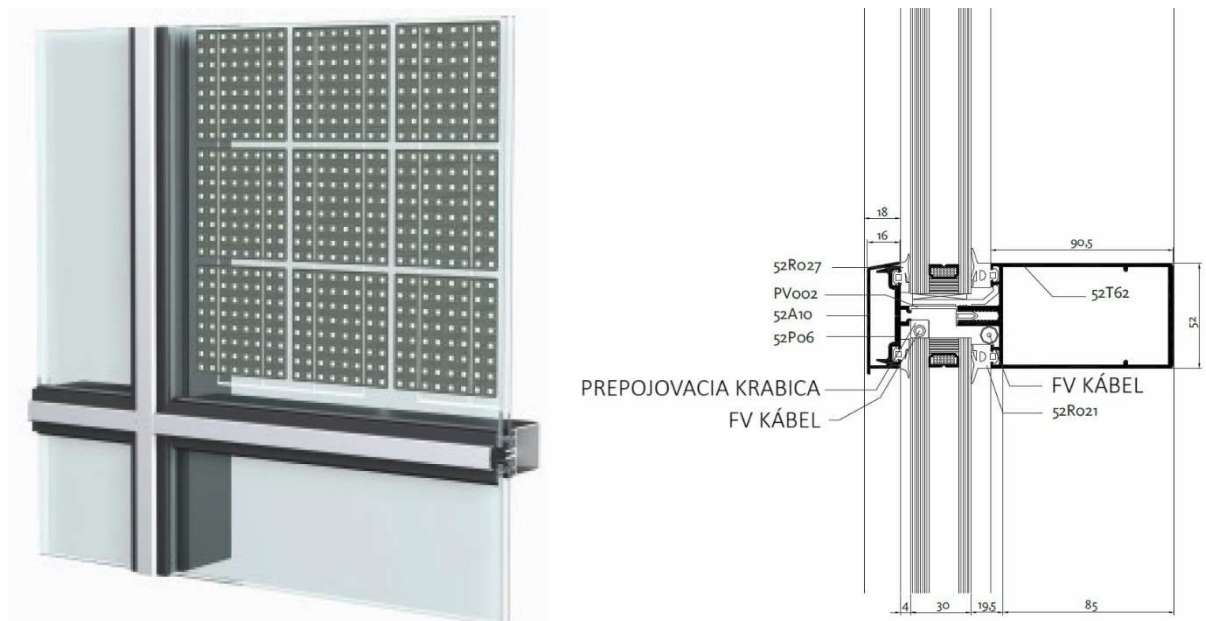
Z energetického hľadiska je potrebné si uvedomiť, ako nastávajú interakcie medzi vnútorným a vonkajším prostredím cez fasádnu konštrukciu. V rámci fasádneho sektoru po výške jedného podlažia je možné rozlične využívať dopadajúce slnečné žiarenie, v závislosti od zníženia energie na vykurovanie/chladenie, distribúciu denného svetla a samotného výhľadu do exteriéru (Obr. 4.10). Integrácia BIPV modulov v rámci dynamických fasádnych prvkov ponúka možnosť nastaviť rôzne funkcie: produkciu elektriny a vyváženie energetického výkonu so samotným architektonickým výrazom.



Obr. 4.10 Obvodová stena pôsobí ako mediátor medzi interiérom a exteriérom a plní rôzne funkcie [52]

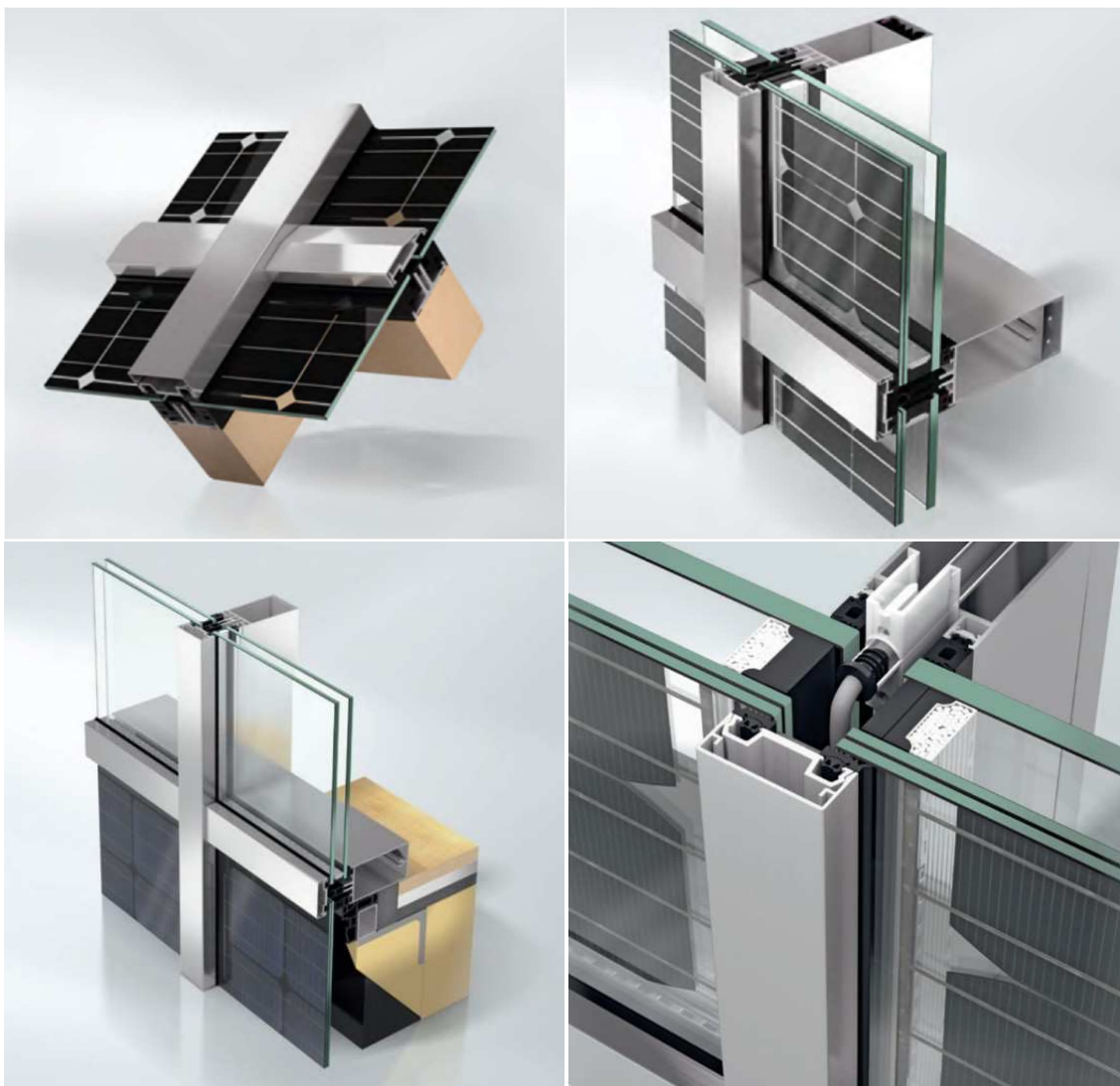
4.1.2 Ľahké BIPV fasády

Ľahké fasádne konštrukcie prevažne pozostávajú zo zvislých stĺpikov spojených vodorovnými priečnikmi, kde vzniknutý priestor môže byť vyplnený transparentnou, polo-transparentnou, prípadne nepriehľadnou konštrukciou, ktorá by plnila rôzne funkcie, ako je opláštenie, osvetlenie a vetranie. Systémy ľahkých obvodových plášťov s jednoduchým, dvojitém alebo trojitým zasklením s adekvátnou U -hodnotou predstavujú vhodnú konštrukciu pre integráciu tenkovrstvových alebo kryštálických FV modulov (Obr. 4.11). Umiestnenie a veľkosť FV modulov, ale najmä pri tenkovrstvových FV systémoch vzájomná vzdialenosť tenkých FV článkov, určuje celkovú moduláciu denného osvetlenia a má priamy vplyv na vnútorný komfort budovy. Tieto BIPV moduly poskytujú čiastočnú ochranu pred slnkom, avšak na druhej strane môžu prispieť k ohrievaniu vnútorného vzduchu v interiéri. Celkový vzhľad a problém denného osvetlenia musia byť uvažované v procese navrhovania takéhoto obvodového plášťa. Aj v prípade neobvyklých geometrií fasád je možné FV moduly a články tvarovať tak, aby dokonale zapadali do okrajov budovy. Taktiež je potrebné uvažovať s dostatočným priestorom pre kabeláž a konektory v rámci nosných prvkov (stĺpikov a priečnikov) ľahkého fasádneho systému.



Obr. 4.11 Konštrukcia ľahkého obvodového plášťa s FV modulmi: axonometria konštrukcie (vľavo), skladba konštrukcie (vpravo) [53]

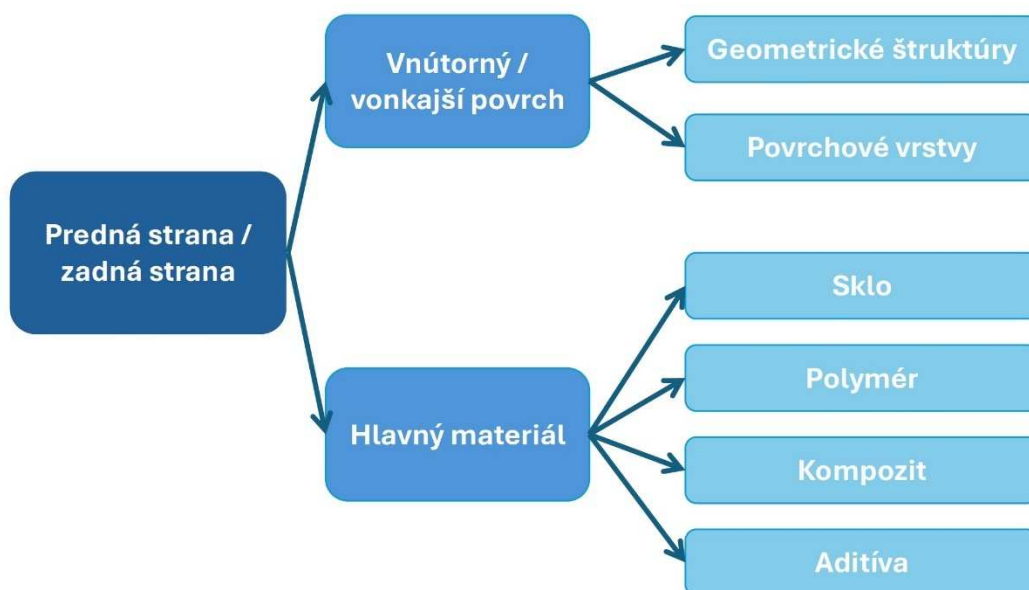
Flexibilný komponentový fasádny systém je vytvorený prostredníctvom systémových komponentov na uloženie kabeláže, kde je možná jednoduchá integrácia BIPV modulov do fasádnych systémov (fasádny stenový systém + prídavná konštrukcia) (Obr. 4.12). Široká škála aplikácií modulov umožňuje riešenia na mieru pre rozličné typy obvodovej konštrukcie (nevetraná fasáda, čiastočne vetraná fasáda, nevetraná fasáda, dvojité fasáda).



Obr. 4.12 Konštrukcia ľahkého obvodového plášt'a s FV modulmi [54]

4.1.3 Farebnosť BIPV fasád

Fasádne BIPV moduly môžu byť vyhotovené v rôznej farbe a textúre pre zvýšenie estetického stvárnenia samotnej budovy. Krycie materiály pre predný a zadný kryt FV modulu môžu byť úplne odlišné (napr. sklo ako predný kryt a vrstvené polymérové fólie ako zadný kryt). Môžu sa však kategorizovať podľa rovnakej konfigurácie: vonkajší povrch, hlavný materiál a vnútorný povrch (Obr. 4.13).



Obr. 4.13 Krycie materiály a povrchy FV modulu

Povrchy (vonkajšie, vnútorné) môžu byť štruktúrované, náterové, alebo dokonca ukončené ďalšími dodatočnými vrstvami, prípadne ich kombinácie. Avšak samotná zmena farby štandardného FV modulu môže viesť k zníženiu jeho elektrickej účinnosti, v prípade, ak je transfer slnečného žiarenia v spektrálnom rozsahu absorbovanom FV článkom výrazne znížený farbiacim médiom, ako je to v prípade farebných pigmentov. Pri použití štruktúrnych farieb je však strata výkonu nižšia, ak sa farebný vzhľad dosiahne spektrálne selektívnou odrazivosťou len v úzkom spektrálnom rozsahu nanosením interferenčných povlakov na vhodne upravené povrchy. Sfarbenie môže byť dosiahnuté: samotným FV článkom, zapuzdrením, medzivrstvami alebo predným prípadne zadným krytom. Zmeny ovplyvňujúce materiály umiestnené za FV článkom zahŕňajú malé alebo nevýznamné straty účinnosti. Naopak, zmeny v materiáloch pred FV článkom môžu spôsobiť značné straty. V týchto prípadoch sú straty veľmi závislé od farby. Na zmenu farebného vzhľadu FV článkov sa bežne používa nitrid kremíka alebo oxid titánu. Matné povrchy farebných modulov na Obr. 4.14 sú príkladmi pre svetlorozptyľujúce vysoko priepustné, antireflexné povrchy. Farebné FV moduly ponúkajú pre architektov, developerov a pamiatkarov široké možnosti dizajnu a estetiky pri návrhu a obnove fasádnych konštrukcií (Obr. 4.15).



Obr. 4.14 FV moduly so spektrálne selektívnou štruktúrou MorphoColor umiestnenou na vnútornej strane predného krytu [55]



Obr. 4.15 Skúšobná inštalácia farebných modulov MegaSlate Flair DCP v Berne od firmy 3S Swiss Solar Solutions AG [56]

4.1.4 Vývojové koncepty BIPV fasád

BiPV konštrukcie predstavujú systémy, ktoré vo svojej podstate sú schopné iba vyprodukovať elektrickú energiu zo slnečného žiarenia. Avšak postupom času sa skúmali nové typy BIPV systémov, ktoré by okrem produkcie elektrickej energie rozumne využívali aj vyprodukovanú tepelnú energiu na zadnej strane FV, nazývajú sa BIPV/T (*angl. Building integrated Photovoltaic/Thermal*). Koncept BIPV/T sa objavil na začiatku 90. rokov 20. storočia. Od roku 2000 priťahuje čoraz väčšiu pozornosť vďaka svojmu potenciálu uľahčiť projektovanie budov s takmer nulovou potrebou energie prostredníctvom lepšieho využívania slnečnej energie.

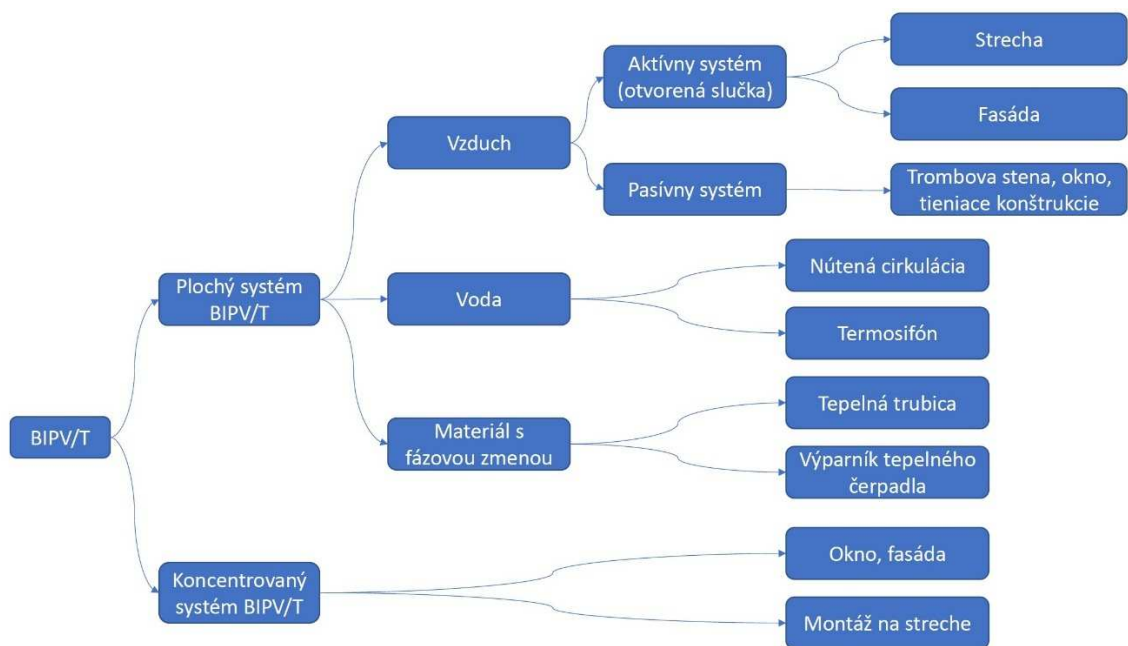
Tepelná energia sa absorbuje do určitého teplotného média a slúži zväčša ako podporný energetický zdroj pre techniku prostredia budov, alebo smeruje do zásobníkov tepla (Obr. 4.17).

Vo všeobecnosti systémy BIPV/T majú nasledovné základné vlastnosti [57]:

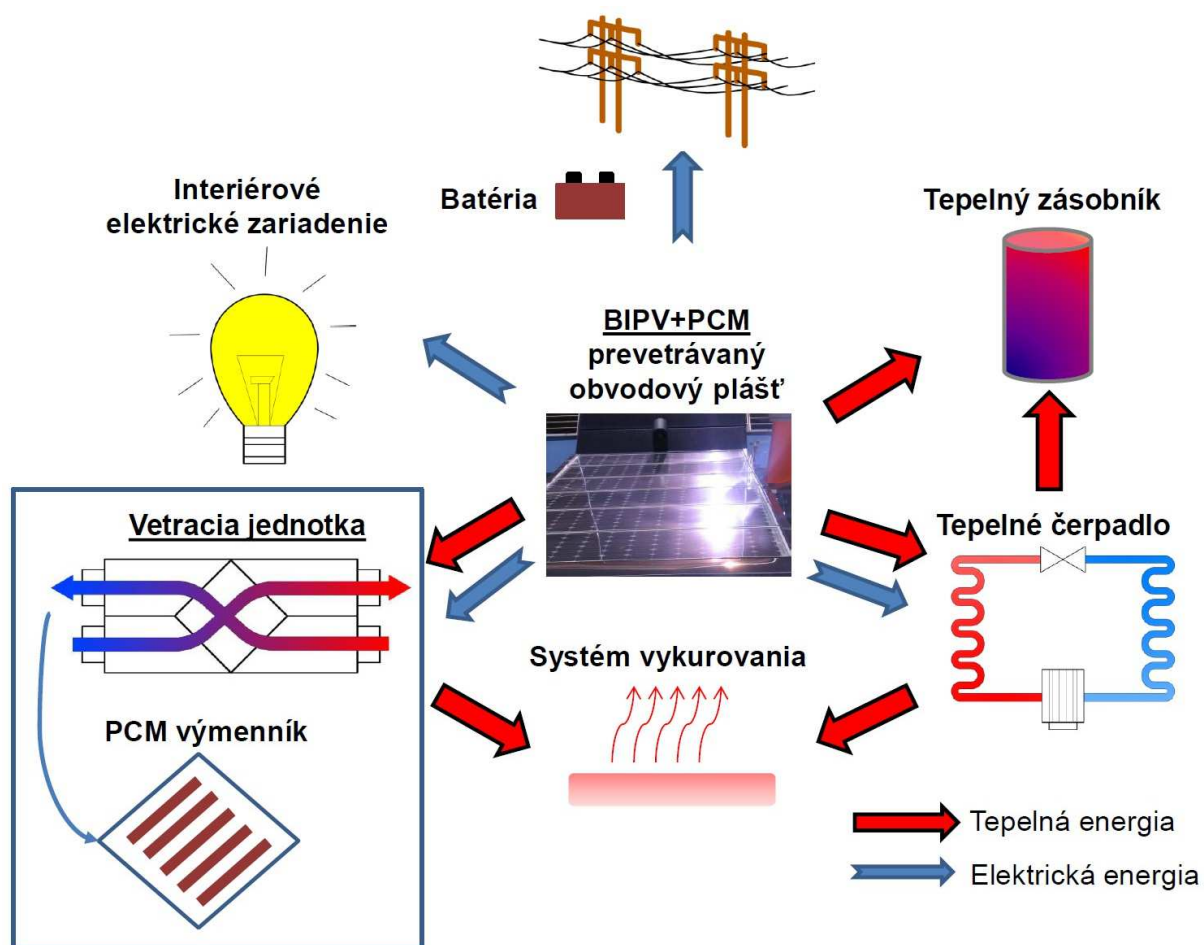
- Systém je fyzicky spojený s budovou;
- Systém generuje elektrickú energiu;
- Systém generuje tepelnú energiu pripravenú na okamžitý odber a využitie budovou, alebo celková stavebná tepelná technika daného systému na pozitívny vplyv na celkovú energetickú účinnosť budovy.

BIPV/T systém, možno diferencovať na jednotlivé kategórie v závislosti od teplotného média (Obr. 4.16). Daný systém nepracuje iba ako zdroj energie, ale taktiež ovplyvňuje celkovú energetickú bilanciu budovy vzhľadom na nasledujúce vlastnosti:

- Časť slnečného žiarenia je priamo premenená na elektrickú energiu prostredníctvom FV modulu, predtým ako je prejde cez obalovú konštrukciu;
- Časť absorbovanej solárnej energie je odobratá vo forme tepla prostredníctvom chladiaceho média;
- BIPV/T komponent mení celkovú hodnotu súčiniteľa prechodu tepla (U) [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$] obalovej konštrukcie, k čomu je prispôsobený tepelný tok medzi vonkajším a vnútorným prostredím;
- Solárna absorbanca obalovej konštrukcie je zmenená prostredníctvom tradičných stavebných konštrukcií, reflexnými FV modulmi;
- FV modul bráni slnečnému žiareniu dopadať na vnútornú obalovú konštrukciu.

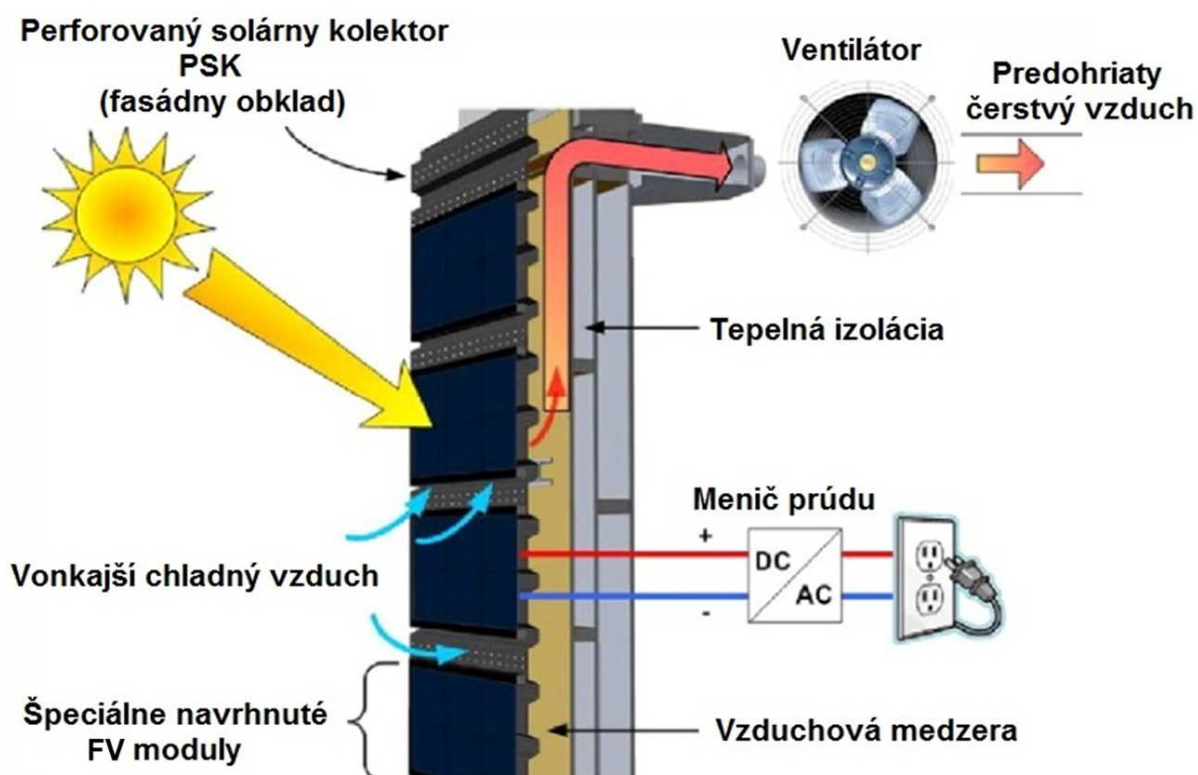


Obr. 4.16 Kategorizácia systémov BIPV/T



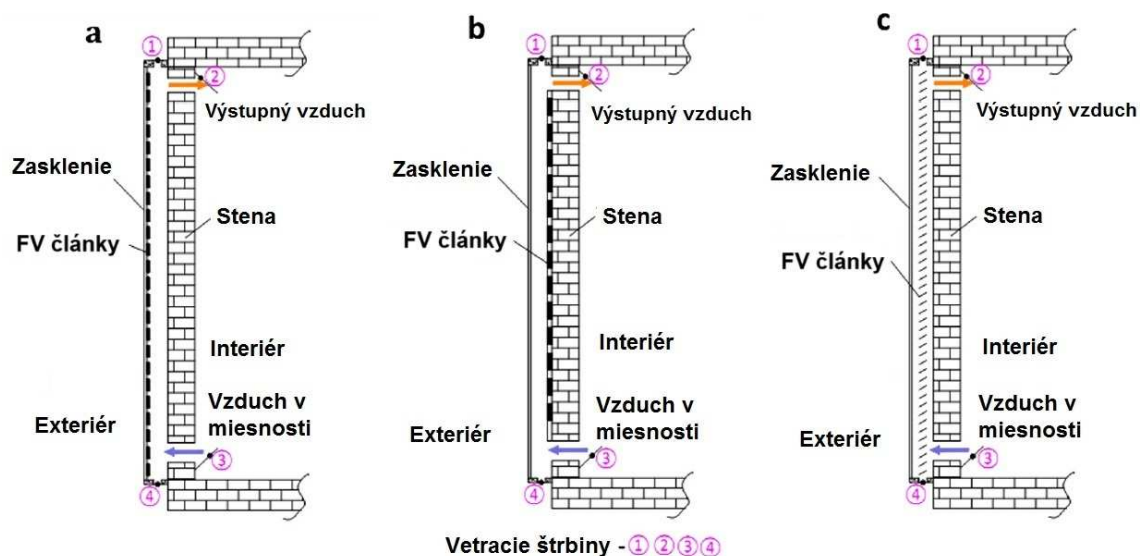
Obr. 4.17 Prepojenie systémov BIPV/T s technikou prostredia budov

Uvedené BIPV/T systémy možno aplikovať vo fasádnych konštrukciách, v ktorých je prúdiaci vzduch teplotnosným médiom. Vzduch má malú hustotu v porovnaní s ostatnými médiami, poskytuje jednoduchší spôsob pre transfer tepla a nevyžaduje si zložité inštalácie na technológie v rámci celkovej konštrukcie obvodového plášťa. Pohyb vzduchu môže byť prirodzený (pasívny), alebo nútený (aktívny). Aktívny BIPV/T systém sa bežne inštaluje ako konfigurácia otvorenej slučky, pri ktorej je vonkajší vzduch vháňaný do fasádnej medzery pomocou ventilátora a prechádza pozdĺž celej medzery obvodového plášťa (Obr. 4.18) [58].



Obr. 4.18 Schematická ilustrácia vzduchového systému BIPV/T s otvorenou slučkou [58]

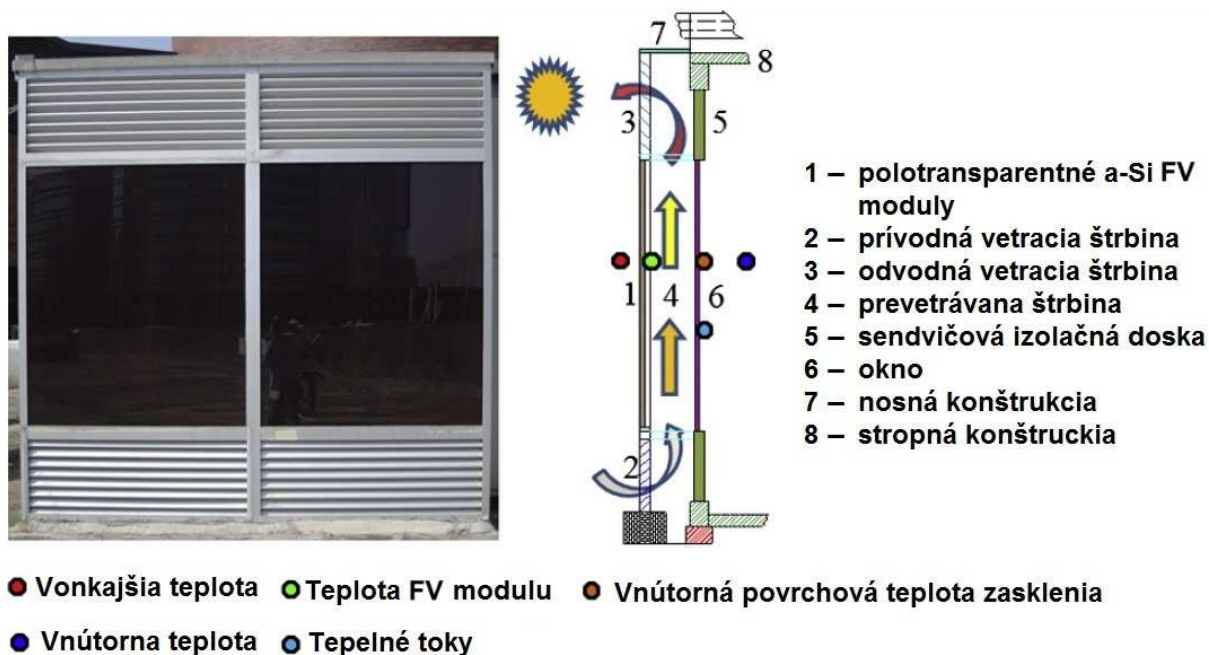
Trombov BIPV stenový systém tiež dokáže pokryť určitú časť potreby tepla na chladenie a vykurovanie a popritom generovať elektrickú energiu. Skúmali sa aj rôzne možnosti umiestnenia FV článkov v rámci tejto celkovej integrácie, napr. FV články umiestnené na vonkajšom exteriérovom zasklení (FVVEZ), na obvodovej stene (FVOS) a ako tieniace konštrukcie v medzere (FVTK) (Obr. 4.19) [59].



Obr. 4.19 Schematické zobrazenie troch typov Trombových BIPV stenových systémov:

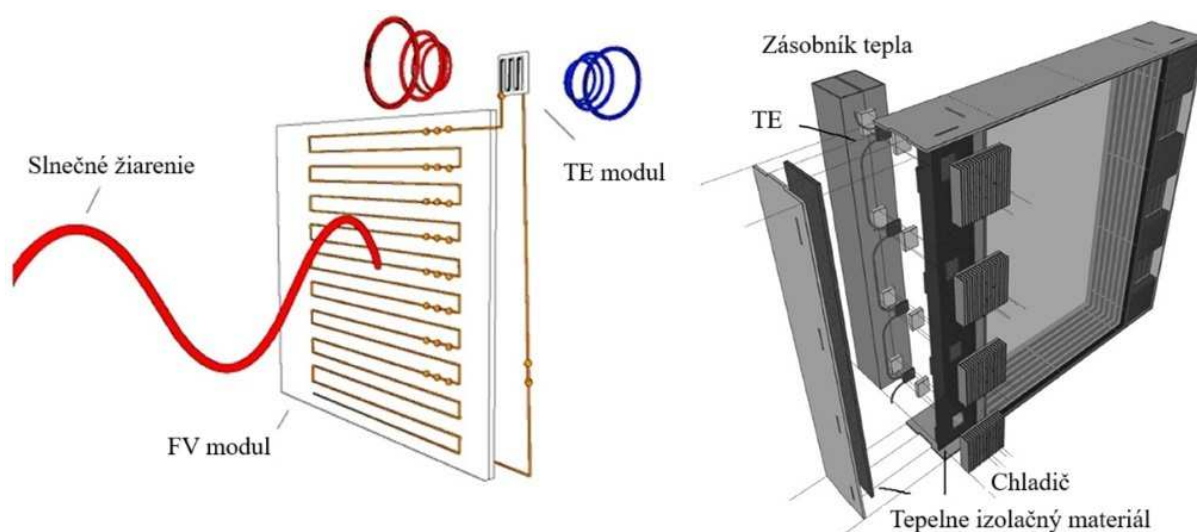
a – FVVEZ, b – FVOS, c – FVTK [59]

Dvojité polotransparentné prevetrávané BIPV obvodové plášte s vetracími štrbinami ako prechod od dvojitého BIPV okenného zasklenia (neprevetrávaného) dokážu zredukovať celkovú tepelnú záťaž takmer o polovicu, čo bolo aj dokázané experimentálnymi meraniami (Obr. 4.20). Vnútna tepelná pohoda v interiéri bola zlepšená v dôsledku zníženia BiPV povrchovej teploty [60]. Takéto riešenia je možné uvažovať napríklad v tropických klimatických oblastiach.



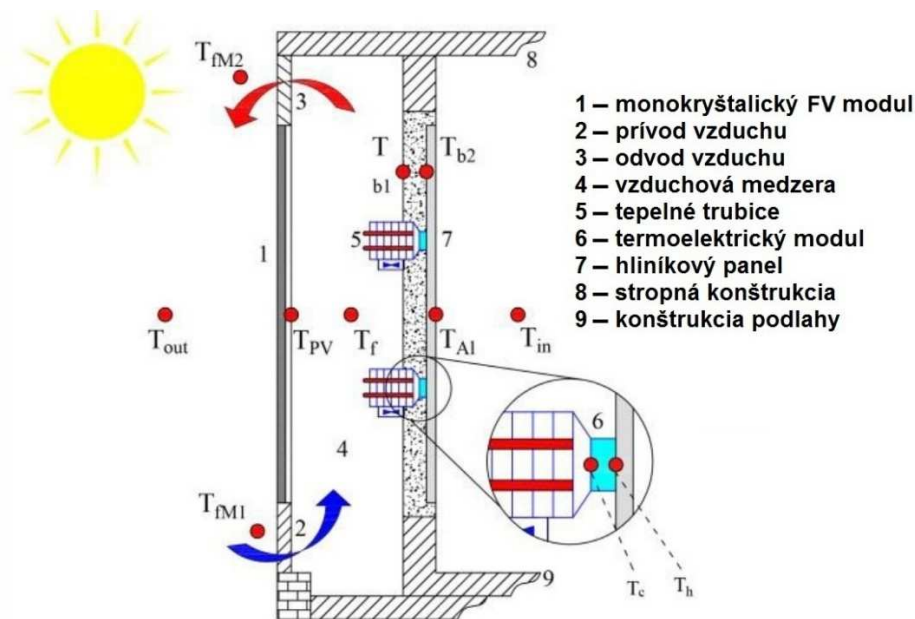
Obr. 4.20 Konštrukcia ľahkého prevetrávaného BIPV obvodového plášťa [60]

Na podobnom princípe sa skúmal ďalší typ sofistikovanejšieho fasádneho BIPV systému v kombinácii s termoelektrickými (TE) článkami (Peltierov efekt). V týchto systémoch sa slnečná energia premieňa na elektrickú pomocou fotovoltických článkov, pričom vyrobená elektrina napája sériu TE modulov. V závislosti od smeru elektrického prúdu aplikovaného na TE moduly, môžu tieto aktívne fasádne systémy (AFS) fungovať buď v režime vykurovania, alebo chladenia. Tieto systémy umožňujú chladenie budovy v lete a poskytovanie tepla v zime. Na Obr. 4.21 je znázornený prenos energie v systémoch AFS, kde slnečné žiarenie zachytáva FV panel, ktorý generuje elektróny a vytvára elektrický prúd. Tento prúd sa následne aplikuje na TE modul, čo vedie k zvýšeniu alebo zníženiu teploty na jeho opačných stranách.



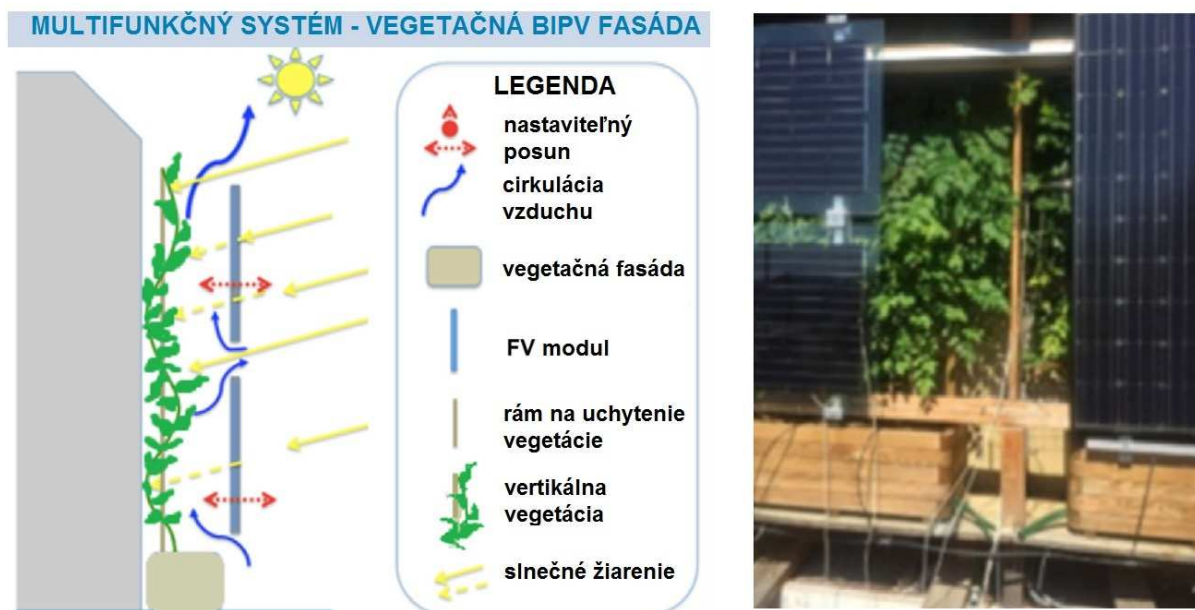
Obr. 4.21 Systém AFS s TE modulmi [61]

Tento systém je možné aplikovať aj do dvojitéch FV fasád, kde samotný princíp je založený na vzájomnej spolupráci FV modulov slúžiacich na transformáciu slnečného žiarenia, vzduchovej medzery na rozptyl tepelnej energie a TE panel pre aktívne radiačné vykurovanie/chladenie (Obr. 4.22). Elektrická energia vyprodukovaná prostredníctvom FV (jednosmerný elektrický prúd) sa priamo využíva na poháňanie termoelektrického článku, ktorý tvorí aktívny prvok ovplyvňujúci celkovú energetickú bilanciu budovy [62].



Obr. 4.22 Schematické zobrazenie termoelektrického BIPV fasádneho systému [62]

Začali sa objavovať prvé koncepcie vegetačných BIPV obvodových plášťov, kde sa vlastne spájajú dva konštrukčné systémy, vegetačná fasáda a BIPV do jedného multifunkčného systému. Úlohou vegetácie je vytvoriť tepelnú nárazníkovú zónu na zadnej strane FV modulov a taktiež poskytnúť tepelnú reguláciu pracovnej teploty FV článkov (Obr. 4.23). Experimentálne bolo dokázané, že rastlinstvo je schopné rásť za FV modulom a má pozitívny vplyv na teplotu FV článkov, zníženie teploty v intervale od 2 °C do 4 °C a celkovej priemernej teploty od 1 °C do 2 °C v klimatickej oblasti Viedeň, Rakúsko [63].

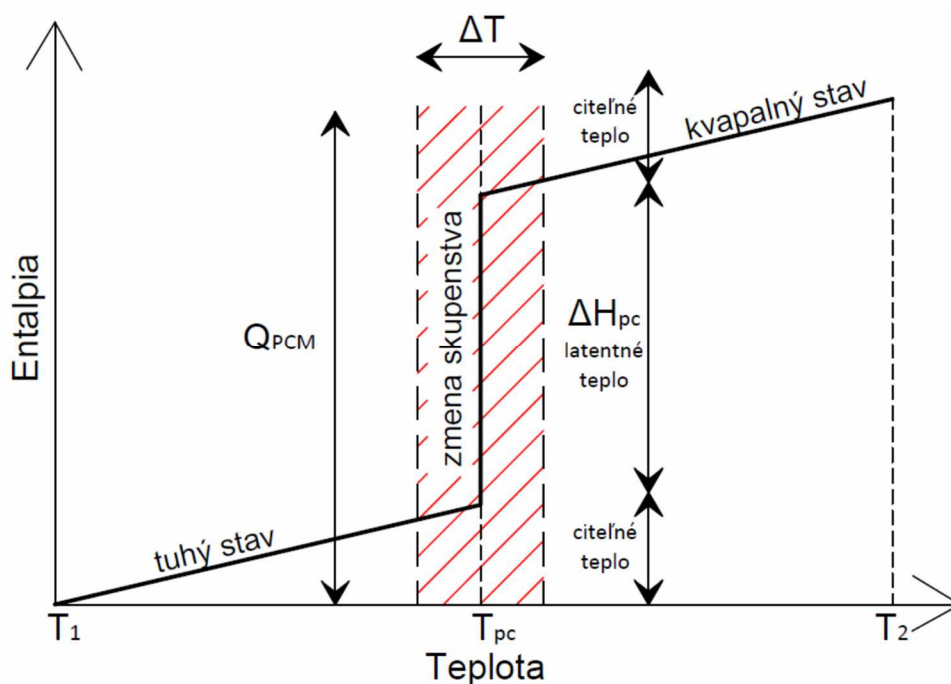


Obr. 4.23 Schematické/reálne zobrazenie multifunkčného systému BIPV vegetačnej fasády [63]

4.2 BIPV+PCM systémy

Prvé zdokumentované použitie materiálu s fázovou zmenou na pasívnu formu vykurovania v budovách možno pripísať chemickej inžinierke Dr. Marii Telkesovej, tiež na nazývanej “Sun Queen” (Slnečná kráľovná), ktorá v roku 1948 v Doveri, Massachusetts, navrhla vykurovací systém pre experimentálny solárny dom [64]. Samotné vykurovanie bolo založené na princípe zachytenia a uskladnenia slnečnej energie pomocou chemickej reakcie kryštalizácie materiálov na báze tavených solí, konkrétne síran sodný (Na_2SO_4), tiež nazývaný Glauberova soľ.

Materiál s fázovou zmenou PCM (*angl. Phase Change Material*) predstavuje, ako už napovedá jeho samotný názov, špeciálny typ materiálu, ktorý dokáže v rámci svojej veľkej tepelnej kapacity (latentné teplo), uskladniť veľké množstvo tepelnej energie počas zmeny skupenstva pri určitom úzkom rozsahu teplôt (z tuhej na kvapalnú fázu, z kvapalnej na plynnú fázu), alebo uvoľniť tepelnú energiu (z plynnej na kvapalnú fázu, z kvapalnej na tuhú fázu). Ide o izotermický proces (Obr. 4.24). Zväčša sa aplikujú do stien budov PCM materiály so zmenou skupenstva z tuhej na kvapalnú a opačne, prípadne tzv. solid-solid, ktoré ostávajú stále v tuhej fáze (alotropická modifikácia). Zmena skupenstva z kvapalnej na plynnú si vyžaduje riešiť problém obrovskej objemovej rozťažnosti, kde by bol potrebný objemovo veľký uskladňovací kontajner. Samotné využitie PCM v požadovaných aplikáciách si vyžaduje splnenie viacerých podmienok (termodynamických, kinetických a chemických).



Obr. 4.24 Graf závislosti entalpie od zmeny teploty počas fázovej zmeny PCM

Zmenu skupenstva PCM podľa grafu izotermického procesu teploty a entalpie možno vyjadriť aj matematicky použitím rovnice celkového tepla (citeľného a latentného) uskladneného v PCM za zmeny teploty (2).

$$Q_{PCM} = \int_{T_1}^{T_{pc}} C_{p,s} \cdot dT + \Delta H_{pc} + \int_{T_{pc}}^{T_2} C_{p,l} \cdot dT \quad (5)$$

kde:

Q_{PCM} – celkové teplo naakumulované v PCM [J.kg⁻¹]

C_p – špecifická tepelná kapacita v tuhom stave (s) a tekutom stave (l) [J.kg⁻¹.K⁻¹]

T_{pc} – teplota fázovej zmeny [°C]

ΔH_{pc} – teplo topenia, resp. fázovej zmeny [J.kg⁻¹]

Ideálne v praxi by PCM materiály mali mať rozsah teplôt fázovej zmeny v rámci predpokladanej aplikácie, taktiež by mali mať vysoké latentné teplo a vysokú tepelnú vodivosť. V praxi sa vyskytuje niekoľko druhov PCM, ktoré sa líšia hlavne chemickou štruktúrou a vyznačujú sa odlišnými vlastnosťami (Obr. 4.25). Hlavná klasifikácia PCM sa delí na organické, anorganické a eutektiká. Najviac využívané sú parafríny (Obr. 4.26).



Obr. 4.25 Klasifikácia PCM

Vo všeobecnosti sú parafríny kompatibilné so všetkými kontajnermi na báze kovových materiálov, avšak na niektoré druhy plastových kontajnerov pôsobia, tak, že ich zmäkčujú. Parafríny majú relatívne nízku tepelnú vodivosť (0,15 – 0,3 W/m.K⁻¹), preto veľké množstvo latentného tepla je potrebné počas cyklu tuhnutia. Táto vlastnosť môže byť zlepšená zakomponovaním kovových plnív, alebo iných techník, v materiáli [65].

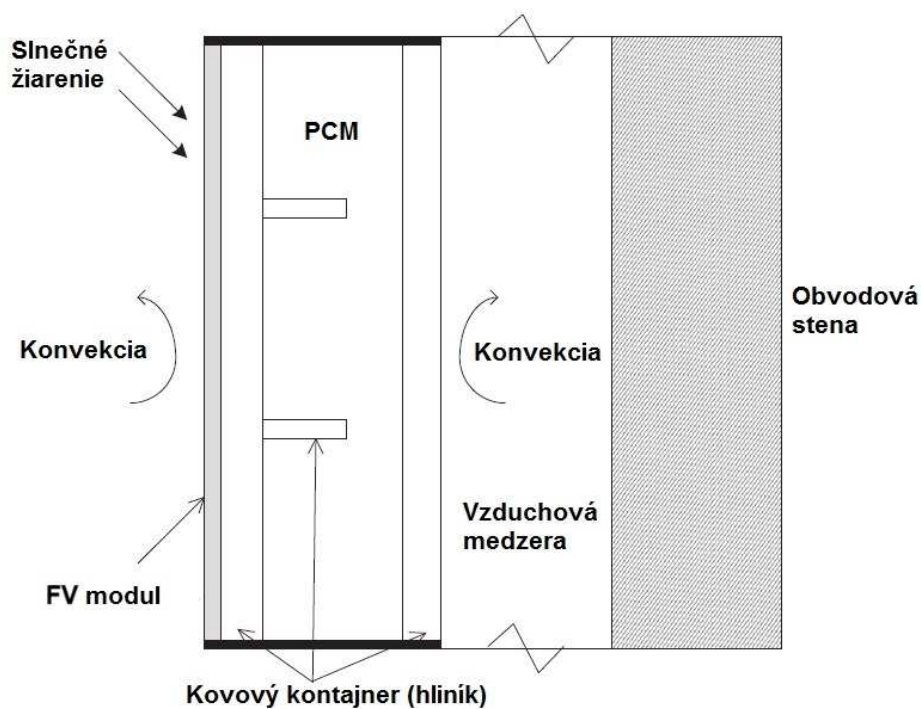


Obr. 4.26 Organické PCM na báze parafínov od firmy RUBITHERM [66]

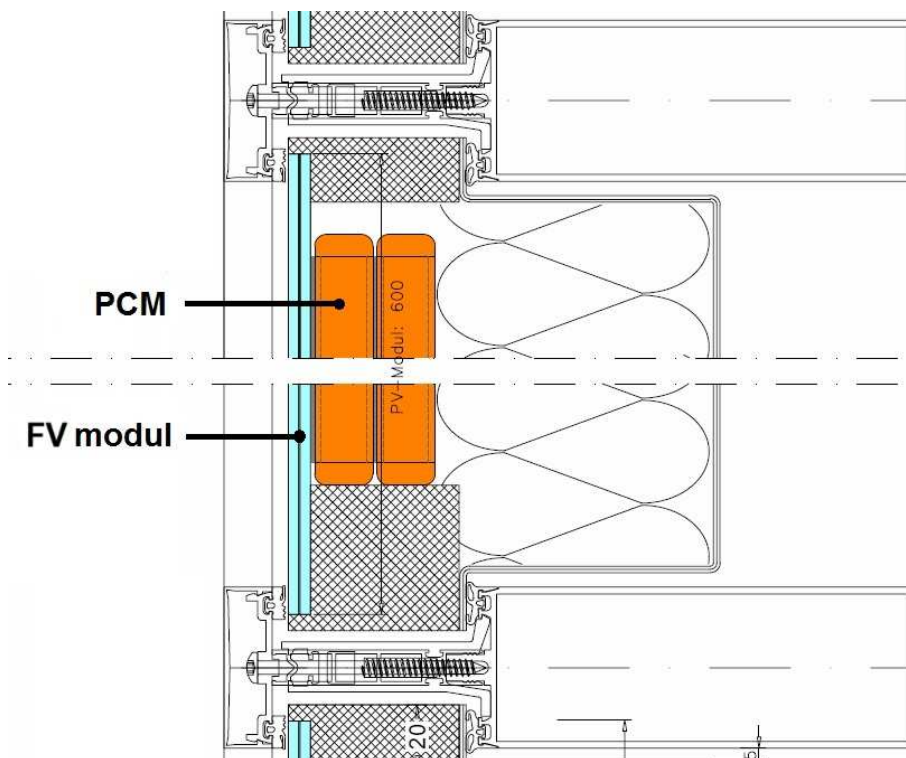
Tepelné správanie PCM má určité komplexnosti, ktoré je potrebné brať do úvahy pri správnom tepelnotechnickom výpočte:

- nelineárny priebeh na rozhraní fázovej zmeny;
- prítomnosť vztlakových prúdov počas procesu fázovej zmeny (topenia);
- objemová rozťažnosť;
- zmena hustoty počas fázovej zmeny;
- možná zmena tepelnej vodivosti počas fázovej zmeny.

Racionálne využitie transferu tepla z BIPV sa skúmalo aj prostredníctvom využitia PCM materiálu s vysokou tepelnou kapacitou. Numericky a experimentálne sa skúmala inkorporácia vhodného PCM materiálu umiestneného na zadnej strane FV modulu na zmiernenie vysokého rastu prevádzkovej teploty v rámci BIPV prevetrávaného obvodového plášťa (Obr. 4.27) a neprevetrávaného obvodového plášťa (Obr. 4.28). Tento systém bol nazvaný BIPV-PCM, predstavujúci hybridnú technológiu integrujúcu FV modul a PCM do jedného systému s cieľom dosiahnuť vyššiu premenu slnečnej energie na elektrickú, v porovnaní so samotným FV modulom [67,68].



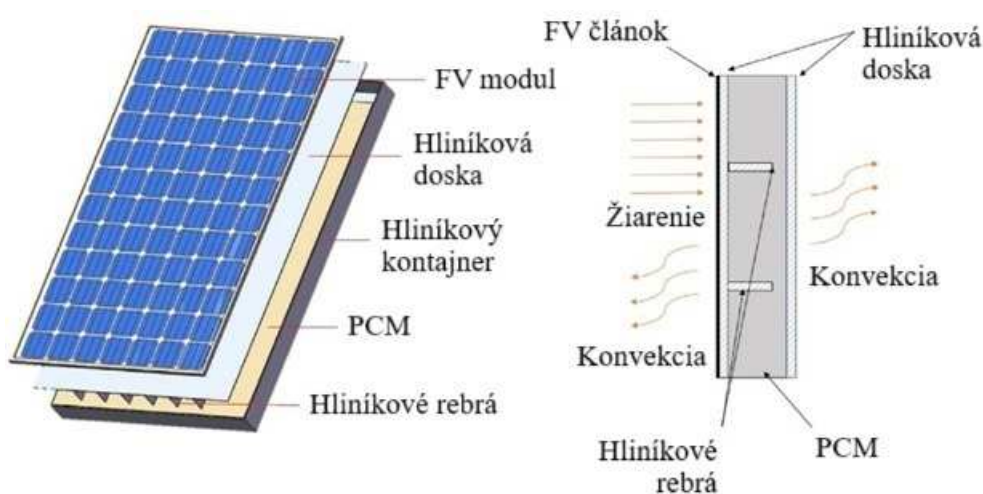
Obr. 4.27 Implementácia PCM do BIPV prevetrávaného obvodového plášťa [69]



Obr. 4.28 Implementácia PCM do BIPV neprevetrávaného obvodového plášťa [70]

Použitím kovových rebier vo vnútri kapsulačnej nádoby PCM sa rozloženie teploty stáva rovnomernejším, a preto slúži na zvýšenie výkonu systému. Avšak v niektorých prípadoch (veľmi nízka hrúbka PCM vrstvy) pripevnenie rebier vo vnútri PCM môže rýchlo znížiť teplotu

PCM (Obr. 4.29), ale jeho fázová zmena prebieha veľmi rýchlo a akonáhle je PCM úplne roztavený, prevádzková teplota FV prudko stúpa [71]. Riadenie tepelnej energie PCM vo fasádnych systémoch BIPV je v podstate založené na absorpcii tepelnej energie počas dňa a jej následnom uvoľnení počas noci. Intenzita slnečného žiarenia je prerušovaná a nepredvídateľná (niektoré predpovede by sa mohli uskutočniť podľa skúšobných referenčných rokov), preto je výber vhodného typu a množstva PCM so správnym teplotným rozsahom fázovej zmeny veľmi dôležitý na zabezpečenie jeho kompletných cyklov topenia/tuhnutia počas dňa a plného využitia kapacity latentného tepla. V súlade s tým ponúka PCM materiál predĺženú dobu dostupnosti tepelnej energie vo fasáde pre nočnú periódu počas dňa.

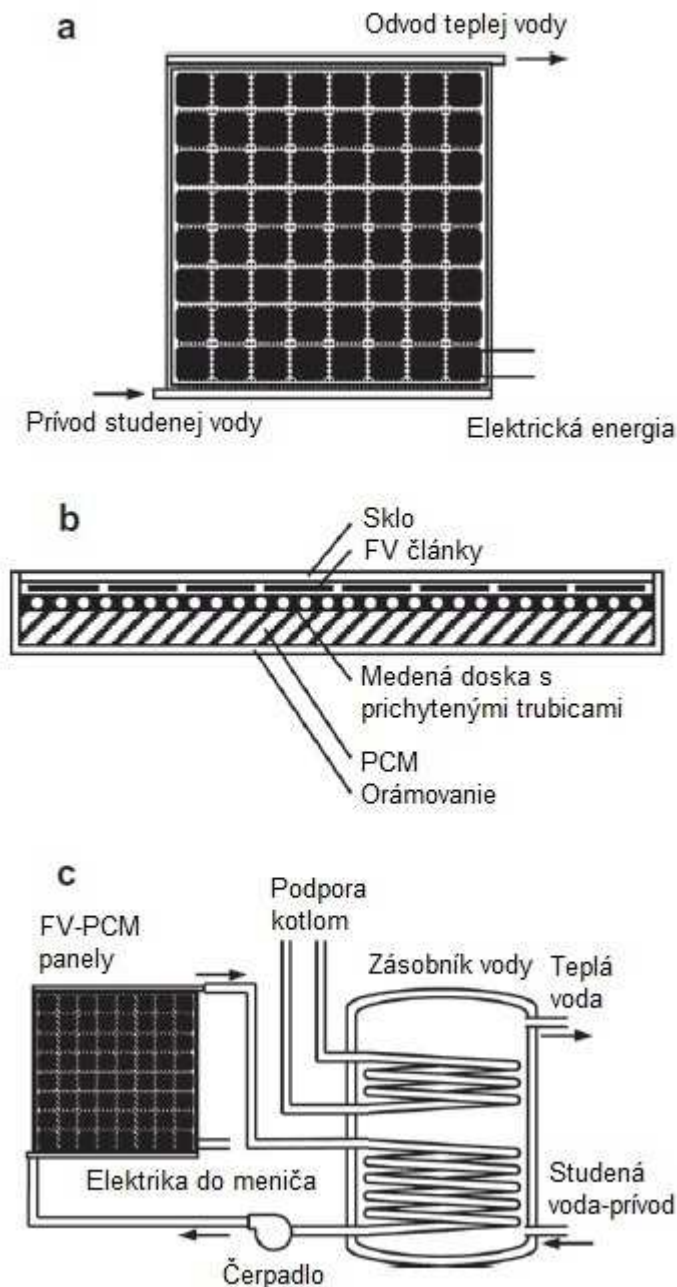


Obr.4.29 FV-PCM systém: 3D pohľad (vľavo), rez (vpravo) [71]

- **Prepojenie BIPV-PCM obvodového plášťa s technikou prostredia budov**

Samotný systém BIPV-PCM s cieľom iba znížiť pracovnú teplotu FV a následne zvýšiť jej účinnosť premeny slnečného žiarenia na elektrickú energiu nemá veľmi veľký potenciál pre energetickú hospodárnosť budov. Je potrebné uvažovať s racionálnym využitím naakumulovaného tepla v PCM ako podporného zdroja pre techniku prostredia budovy. Určité výskumy boli uskutočnené s cieľom využiť tepelnú energiu uskladnenú v PCM pre ďalšie benefity v rámci energetického režimu budovy. Hendricks a kol. [72] potvrdil, že ekonomicky životaschopný systém musí byť kombinovaný s interiérovým kontrolným mechanizmom, ktorý reaguje na dynamickú zmenu vonkajšej klímy. Elektrická energia vyprodukovaná daným systémom je nedostačujúca na pokrytie nákladov spojených s integráciou PCM, čo vedie k tomu, že finančná návratnosť systému ďaleko prekračuje typických 20 rokov. Navyše tepelná energia je potrebná na vykurovanie a vetranie interiéru, predovšetkým v budovách postavených v chladnom klimatickom pásme. Preto je potrebné efektívne uvoľniť a následne využiť teplo

uskladnené v PCM, čo môže daný systém urobiť v budúcnosti ekonomicky životaschopný a návratný v rozumnom časovom intervale. Jeden z prvých konceptov kombinovaného systému BIPV-PCM s využitím tepelnej energie v PCM bol navrhnutý Malvim a kol. [73]. FV články boli osadené na vrchnej strane medenej dosky s prichytenými trubicami vloženými do PCM (Obr. 4.30). PCM aj voda v trubicach boli schopné absorbovať vyprodukovanú tepelnú energiu prostredníctvom FV článkov. Výsledky výskumu ukázali, že integrovaním vhodného typu PCM v optimalizovanom systéme sa dokáže zvýšiť produkcia elektrickej energie pomocou FV článkov o 9 % s priemerným zvýšením teploty vody o 20 °C. Tento pilotný výskum demonštroval, že sa tu nachádza pozoruhodné množstvo potenciálnych možností na realizáciu ďalších výskumov FV-PCM systému, ktoré možno integrovať do obalovej konštrukcie budovy. Predovšetkým, keď je tento systém súbežne spojený s výskumom v oblasti PCM s možnosťou nastavenia teploty fázovej zmeny a vysokej tepelnej vodivosti.



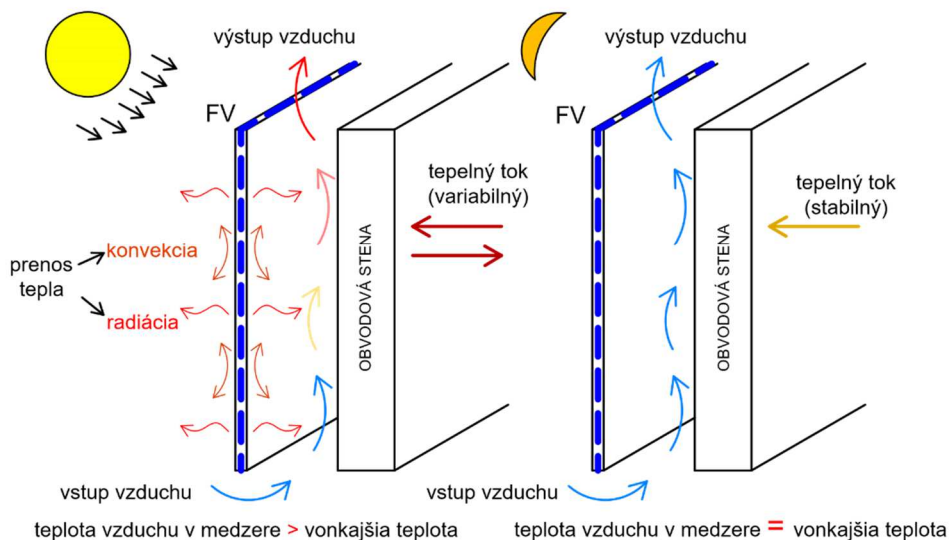
Obr. 4.30 Konštrukčné zloženie FV-PCM panela s využitím naakumulovanej tepelnej energie v PCM: a – čelný pohľad na modul, b – rez modulom, c – typická inštalácia pre aktívny systém s uzavretou slučkou vhodný pre budovy na bývanie [73]

Aktivovanie obvodového plášťa budovy prostredníctvom integrácie solárnych technológií je potrebné z hľadiska dosiahnutia požiadaviek vyplývajúcich z dlhodobého plánu rozvoja Európskej únie. Dvojitý prevetrávaný obvodový plášť s integrovanými FV elementmi poskytuje produkciu elektrickej energie zo slnečného žiarenia a zároveň umožňuje chladenie FV článkov prostredníctvom prevráanej fasádnej medzery, čím sa zvýši účinnosť FV článkov. Aplikácia materiálu s fázovou zmenou PCM (stavebný element schopný uskladniť pomerne

veľké množstvo tepelnej energie počas svojej zmeny skupenstva) na zadnej strane FV modulu dokáže principiálne znížiť prevádzkovú teplotu FV článku a zároveň uskladniť prebytočnú tepelnú energiu vygenerovanú na zadnej strane FV. Pracovný režim PCM pozostáva z denného režimu absorbovania tepelnej energie počas slnečného dňa a následného nočného režimu uvoľňovania absorbovanej tepelnej energie v rámci dvojitého obvodového plášťa (Obr. 4.31), čím sa výrazne dynamicky zmenia jeho stavebno-fyzikálne vlastnosti. PCM so svojou tepelnou zotrvačnosťou môže znížiť a oddialiť maximálne prehrievanie dvojitého obvodového plášťa počas dňa a v noci zvýšiť teplotu vzduchu vo fasádnej medzere, čo sa odzrkadlí na celkovej potrebe energií na techniku prostredia budovy. Vzduch vo fasádnej medzere môže slúžiť ako podporný (obnoviteľný) zdroj napr. pre decentralizované fasádne vetracie jednotky s integrovaným výmenníkom PCM-vzduch (Obr. 4.32). Účinnosť systému závisí aj od rýchlosti a objemu prietoku vzduchu. Tým sa vytvára nová konštrukcia adaptívneho obvodového plášťa, ktorý je schopný aktívne meniť svoje stavebno-fyzikálne vlastnosti v závislosti od dynamickej zmeny klimatických podmienok.

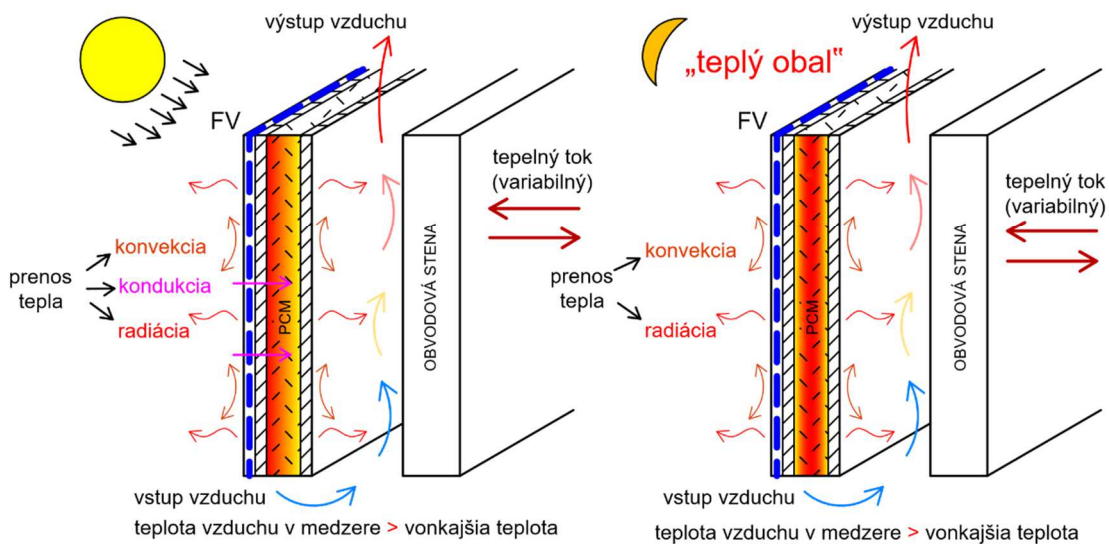
BIPV prevetrávaná fasáda

(slnečný deň, noc)

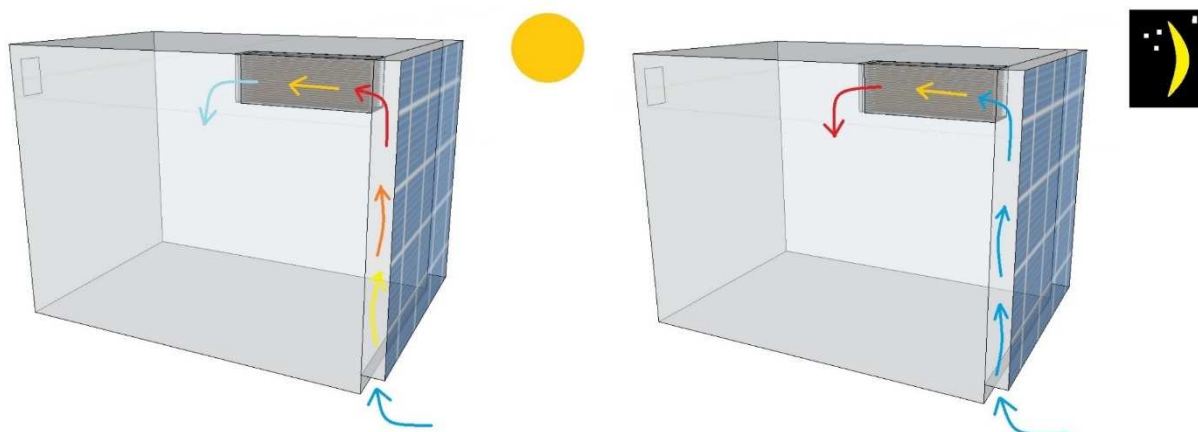


BIPV+PCM prevetrávaná fasáda

(slnečný deň, noc)



Obr. 4.31 Schéma BIPV (hore) a BIPV/PCM (dole) prevetrávanej fasády



Obr. 4.32 Decentralizovaná integrovaná vetracia jednotka v BIPV fasáde s PCM výmenníkom napojeným na vzduchovú vrstvu počas dňa (vľavo) a počas noci (vpravo)

4.3 Tieniace BIPV systémy

FV články a moduly možno integrovať aj do externých tieniacich systémov na reguláciu svetla a zníženie solárnych tepelných ziskov. Samotná integrácia je najmä v riešeniach predsteny a dvojplášťovej fasády. Ľahké fotovoltické materiály ako CIGS ponúkajú flexibilné a zakrivené tvary, vďaka čomu sú vhodné pre dynamické tieniace systémy. Hoci má CIGS v porovnaní s tradičnými c-Si modulmi nižšiu účinnosť premeny energie, je výhodný pre budovy s veľkými, presklenými plochami alebo viacpodlažnými konštrukciami, ktoré vyžadujú tieniace systémy a majú dostatočnú priehľadnú plochu. Fasádne tieniace systémy môžu obsahovať vo svojej štruktúre FV panely priamo integrované v žalúziách, ktoré automaticky sledujú pohyb Slnka na oblohe a produkujú elektrinu z jeho dopadajúceho žiarenia počas celého dňa, pričom svojím tieniacim efektom znižujú nároky na vnútorné chladenie. Tieniace zariadenia je možné klasifikovať na pevné tieniace systémy (panely) a pohyblivé tieniace systémy (žalúzie, rolety). Zatiaľ čo pevné tieniace systémy sú väčšinou samostatné stavebné prvky, pohyblivé tieniace systémy sú často inštalované ako integrálna súčasť otvorových konštrukcií. Ich pohybom sa reguluje slnečné žiarenie, v závislosti od požadovanej vnútornej kvality prostredia interiéru. BIPV žalúzie možno podľa polohy žalúzií voči oknám rozdeliť na vonkajšie, vnútorné a medziľahlé.



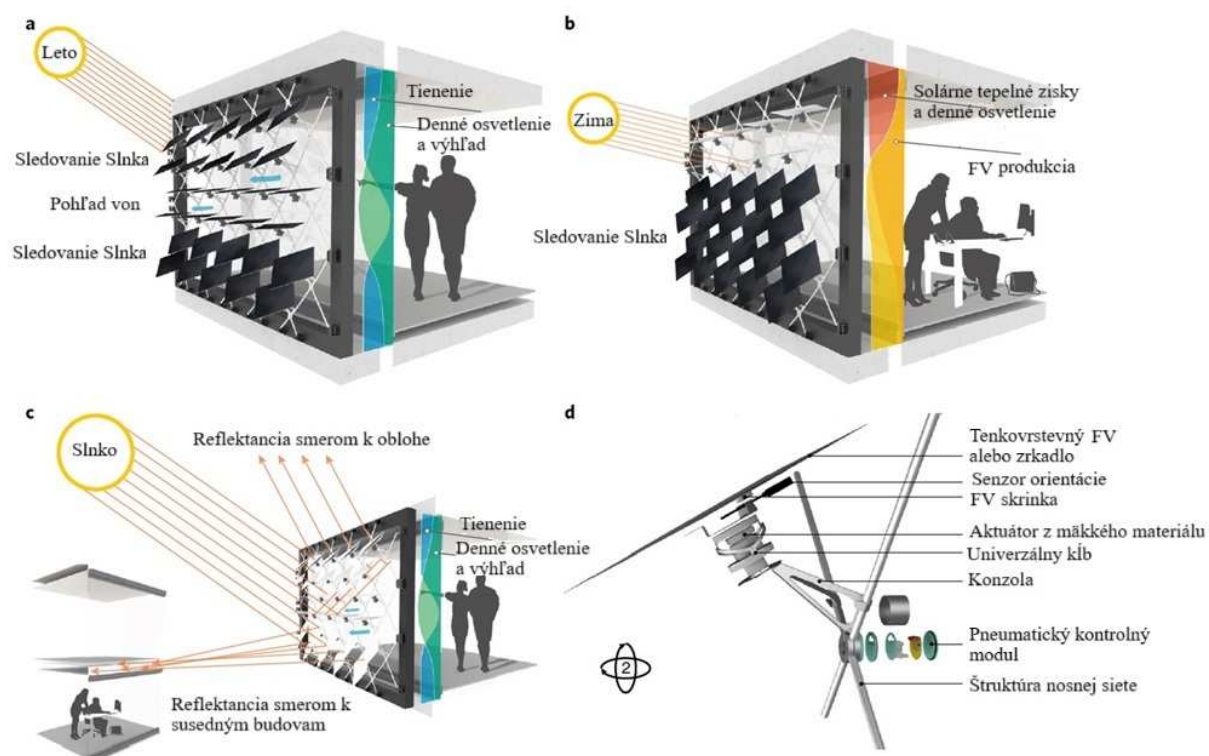
Obr. 4.33 Vonkajšie FV rolety [74]

Pokročilé tieniace systémy v dynamických plášťoch budov sú založené na využívaní robotických solárnych sledovačov pre aktívnu moduláciu slnečného žiarenia, výrobu energie, pasívne vykurovanie, tienenie a regulovanie denného svetla vo vysokom časopriestorovom rozlíšení. Tento obvodový plášť pozostáva z jednotlivých FV modulov namontovaných na ľahkej nosnej konštrukcii tyčovej siete ako vonkajšia vrstva presklenej fasády (Obr. 4.34). Každý modul je vybavený mäkkým pneumatickým pohonom, ktorý umožňuje individuálnu orientáciu v dvoch osiach. Elektrická kabeláž a pneumatické napájanie sú integrované do štruktúry tyč – sieť [75]. Na Obr. 4.34 je zobrazený princíp fungovania a prípady použitia adaptívneho plášťa budovy poháňaného robotickými systémami:

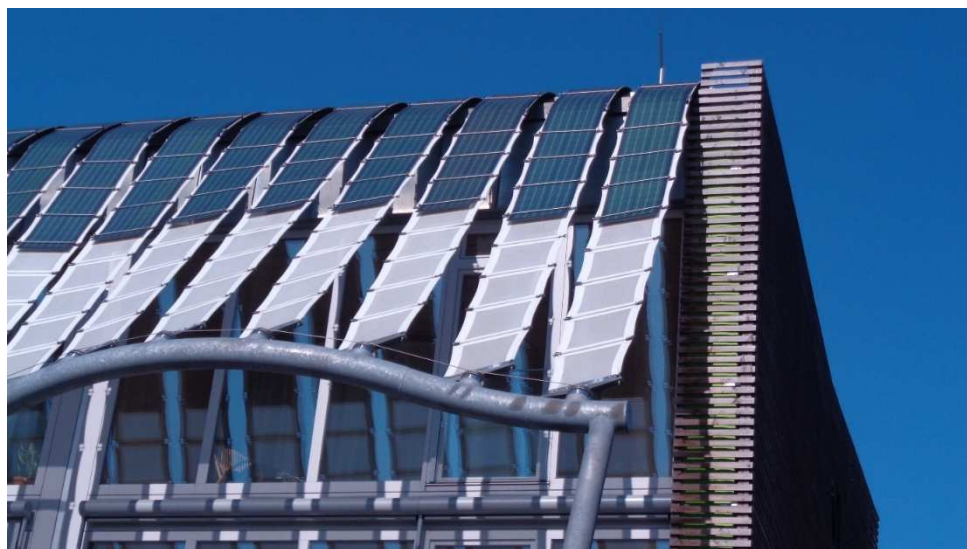
a, b) Miestnosť s adaptívnym FV obvodovým plášťom v letnom (**a**) a zimnom (**b**) dni a kvalitatívnym znázornením fyzikálnych efektov, ktoré môže plášť regulovať.

c) Miestnosť s reflexným adaptívnym obvodovým plášťom. Tento plášť umožňuje redistribúciu slnečného žiarenia a denného svetla medzi budovami tým, že ich odráža do susednej budovy, kde sa koncentrovaný solárny zdroj môže použiť na zlepšenie dostupnosti denného svetla alebo na oblohu, aby sa zmiernili účinky mestských tepelných ostrovov. Modré šípky v **a**) a **c**) označujú možný výhľad von.

d) Individuálny modul obvodového plášťa.



Obr. 4.34 Princíp fungovania roboticky poháňaných FV modulov vo fasáde [75]

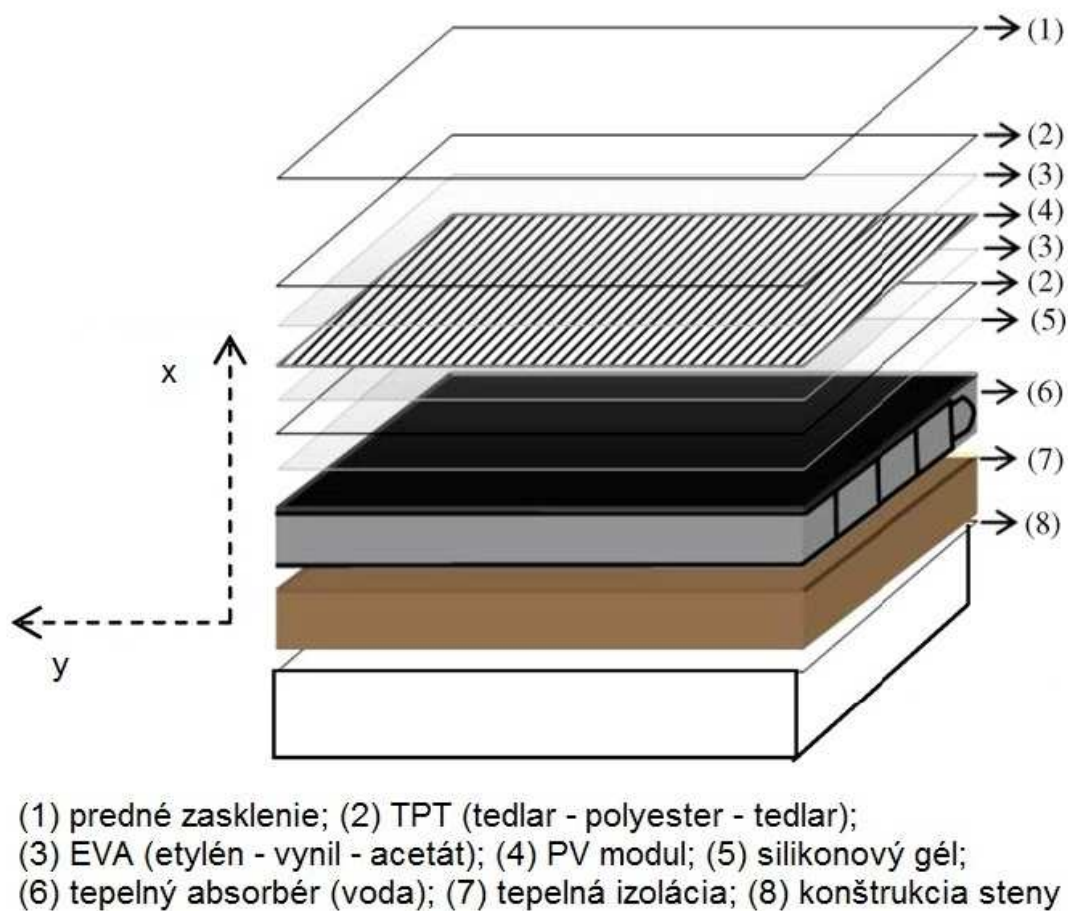


Obr. 4.35 Priečne flexibilné BIPV tieniace lamely na obytnej budove (Hamburg, Nemecko)

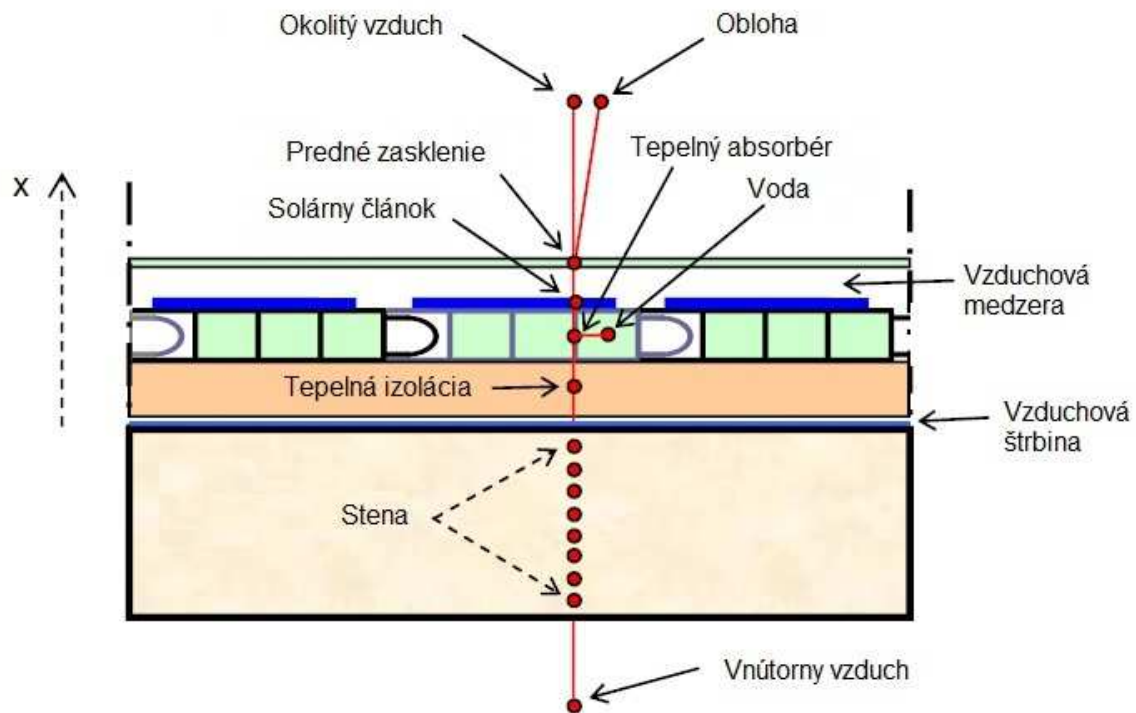
4.4 Vodné BIPV systémy

Fotovoltický systém integrovaný do konštrukcie budovy so systémom vodného teplotnosného média, tzv. BIPVW systém (*angl. building integrated photovoltaic and water –heating system*) je schopný generovať vyšší energetický výkon na jednotku plochy solárneho kolektora v porovnaní s konvenčnými solárnymi systémami. Výskumníci skúmali energetickú náročnosť

takýchto fotovoltických/vodoohrevných systémov s prirodzenou cirkuláciou vody. Tieto štúdie ukázali, že predmetná technológia je sľubná pri podpore systémov prípravy teplej vody. Najmä použitie tepelného absorbéra plochého kolektora sa ukazuje ako veľmi účinné pri prevádzke v termosifónovom režime. Konfigurácia takéhoto hybridného kolektora je znázornená na Obr. 4.35. 25 mm pod predným sklom boli postupne integrované vrstvy priehľadného TPT (Tedlar Polyester Tedlar), EVA (Ethyl Vinyl Acetate), monokryštalického kremíka FV článkov, EVA, transparentného TPT a silikagélu na doske absorbéra spolu s 30 mm tepelnou izolačnou vrstvou na jeho zadnej strane. Obr. 4.36 zobrazuje pohľad v reze cez jednu časť steny BIPVW. BIPVW systém je obzvlášť vhodný na použitie v horúcom alebo teplom podnebí. Tento systém môže znížiť tepelné straty z kolektora, keď solárne články fungujú ako selektívne absorbéry. Tepelné straty je možné ešte viac minimalizovať pridaním predného zasklenia, čo však zároveň môže zvýšiť straty spôsobené odrazom.



Obr. 4.35 Základne vrstvy BIPVW systému [76]



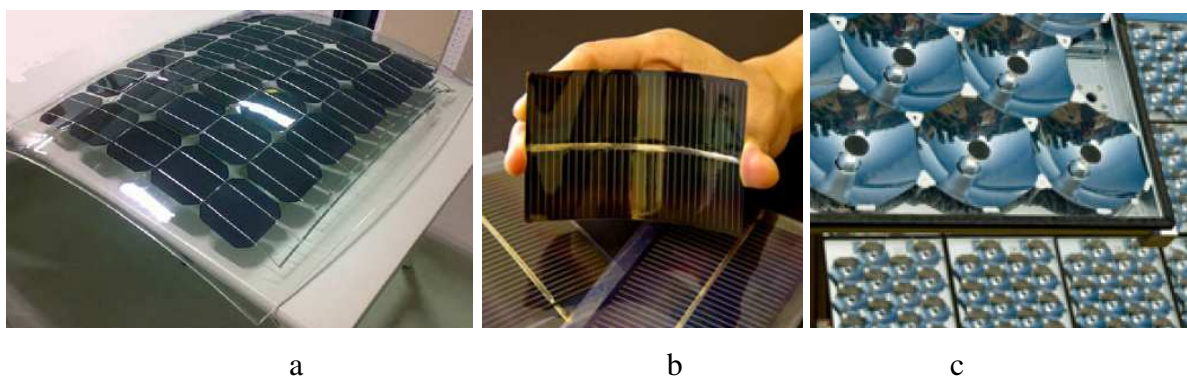
Obr. 4.36 Prierez a uzlová schéma BIPVW systému [77]

4.5 Zakrivené BIPV systémy

Morfológia fotovoltických prvkov môže byť v dnešnej dobe rozličná. Na jednej strane plochý charakter fotovoltických modulov nie je ideálny pre riešenie problémov v budovách, kde nie je možné nastaviť optimálny alebo jednotný uhol pre systém BIPV. Na druhej strane, vzhľad plochých fotovoltických povrchov odhaľuje ich nedostatky z hľadiska využitia architektmi, napr. ich jednoduchý vzhľad a nedostatok estetickej hodnoty. Naopak, otázka, či by mohli fotovoltické povrchy s iným, neplochým tvarom, predstavovať alternatívu k plochým fotovoltickými povrchom, zatiaľ nebola dostatočne preskúmaná. V FV zariadeniach, kde prevládajú primárne ploché komponenty, sú zakrivené FV prvky stále pomerne nezvyčajné. Výskumy sa v tejto oblasti začali realizovať aj vďaka rozvoju súvisiacich odvetví, ako je automobilový priemysel, kde sa postupne objavujú fotovoltické produkty so zakrivenými vlastnosťami. Tieto systémy možno vo všeobecnosti kategorizovať na tri typy [78]:

- Akrylové FV panely;
- Tenkovrstvové FV systémy;
- Parabolické koncentrátory.

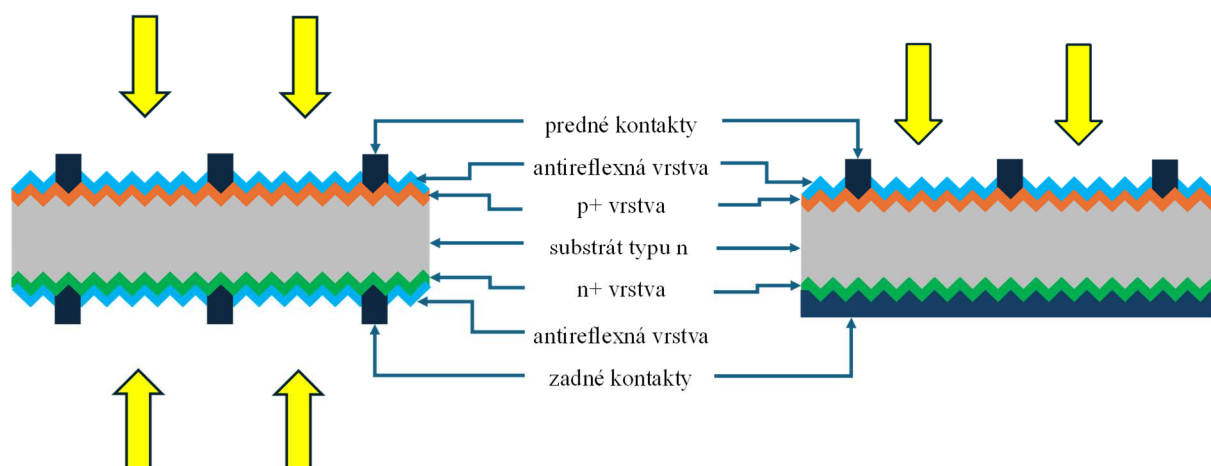
Prvý typ možno demonštrovať na akrylovom FV paneli (Obr. 4.36a), ktorý je vyrobený z kryštalických kremíkových FV článkov, pričom substrát FV modulu nie je pevný, ale ohybný plast. V porovnaní s prvým uvedeným typom by druhý typ zakrivených FV plôch mal mať oveľa širšiu perspektívu. Tenkovrstvová technológia amorfného kremíka má mnoho výhod oproti iným kremíkovým technológiám a najzreteľnejšou z nich môže byť, že a-Si FV povrchy môžu byť podľa potreby ohýbané (Obr. 4.36b). Zvyčajne sa FV prvky tohto typu nazývajú flexibilné solárne panely. Tretí typ je založený na princípe koncentrácie slnečného žiarenia. Koncentračné FV systémy využívajú šošovky alebo zrkadlá na zaostreň slnečného žiarenia na vysokoúčinné solárne články (Obr. 4.36c).



Obr. 4.36 Zakrivené BIPV systémy: a – akrylové, b – tenkovrstvé, c – koncentrátory [78]

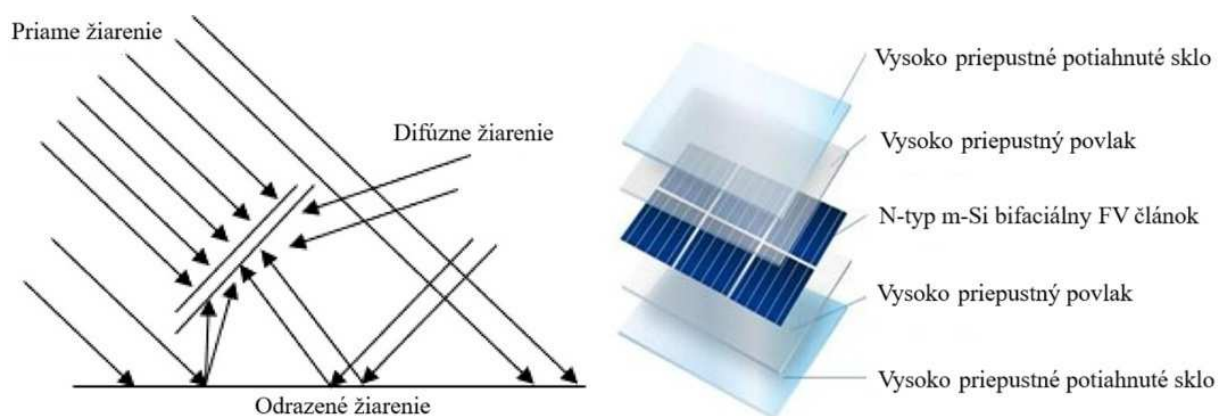
4.6 Bifaciálne BIPV systémy

Bifaciálna (obojstranná) fotovoltická (bFV) technológia sa považuje za sľubnú alternatívu, pretože dokáže generovať viac energie ako konvenčná monofaciálna FV (mFV) technológia absorbovaním slnečného žiarenia z oboch strán FV modulu (prednej a zadnej). Vývoj sa začal od 60. rokov 20. storočia, no ich aplikácia v civilnom sektore začala až okolo 80. rokov 20. storočia. Samotná štruktúra bFV článku obsahuje prídavnú vrstvu antireflexného povlaku, pričom na zadnej strane sú taktiež umiestnené elektrické kontakty namiesto klasického zadného elektricky nevodivého povrchu (Obr. 4.37).



Obr. 4.37 Štruktúra bFV článku (vľavo) a mFV článku (vpravo)

Keď sú bFV články vystavené slnečnému žiareniu, samotné dopadajúce žiarenie prechádza cez jednotlivé antireflexné vrstvy z oboch strán FV článkov (Obr. 4.38). Tieto články umožňujú využívanie odrazeného slnečného žiarenia prostredníctvom ich zadanej strany, čo je výhodné najmä pre stavebné aplikácie, kde sa odráža značná časť dopadajúceho slnečného žiarenia. V posledných rokoch je technológia bFV modulov na trhu čoraz populárnejšia. V porovnaní s mFV modulmi môžu bFV moduly priniesť zlepšenie efektívnosti o 10 % a 15 % pre uhly sklonu 25° a 45°. Vyššia produkcia elektrickej energie a špecifické charakteristiky výroby energie bFV modulov ich robia vhodnými kandidátmi pre integráciu do obalového plášťa budovy. Účinnosť bFV článkov sa meria nezávisle pre predný a zadný povrch, kde faktor bifaciálnosti (%) definuje pomer účinnosti zadnej strany k účinnosti prednej strany pri okamžitom ožiarení. Vo všeobecnosti BIPV fasády majú nie veľmi optimálnu orientáciu z hľadiska sklonu (90 °) v porovnaní s naklonenými strešnými plochami, avšak použitie bFV modulov vo fasádnej konfigurácii môže minimalizovať túto nevýhodu.



Obr. 4.38 Schematický diagram štruktúry bifaciálnych FV článkov [79]

Avšak pre adekvátnu účinnosť zadnej strany bFV modulov sa vyžaduje inštalácia reflexnej vrstvy umiestnenej v optimálnej vzdialenosti, ktorá zabezpečí reflexiu slnečného žiarenia smerom k ich zadnej strane. Tento princíp je možné uplatniť hlavne v systéme dvojitéch fasád. Navyše odrazové vlastnosti náteru vnútorných povrchov miestnosti (strop, steny a podlaha) by mohli byť prispôsobené v prípade aplikácie takýchto bFV zasklených fasád, pričom v dôsledku toho je táto aplikácia odlišná od aplikácie bežných FV modulov a externej aplikácie bFV modulu. Na Obr. 4.39 je znázornený bFV systém s aplikovanou bielou reflexnou fóliou, ktorý vo svojej podstate môže byť inštalovaný vertikálne, horizontálne alebo pod určitým uhlom a je vhodný na integráciu do budov, napr. na fasády, vstupné haly, strechy, zábradlia balkónov.



Obr. 4.39 Bifaciálny modul s bielou reflexnou fóliou [80]

4.7 BIPV sklenené systémy

4.7.1 Klasické zasklenia

Moderné trendy v architektúre spolu s pokrokom v technológiách zasklievania urobili zo skla dôležitý stavebný materiál, ktorý sa bežne používa v rámci fasádnych konštrukcií. Zasklenie umožňuje vstup denného svetla do interiéru budovy, ktoré pozitívne pôsobí na zníženie potreby energií pre umelé osvetlenie počas dňa, ako aj na samotné zdravie a pohodu užívateľov budovy. Rozsiahle používanie skla vo fasádach budov je však spojené hlavne s problémami, akými sú prehrievanie budovy v letom období spojené so zvyšovaním záťaže vzduchotechniky, nízka tepelná zotrvačnosť, nízke povrchové teploty počas chladných období a tepelné straty v zime.

BIPV zasklenia predstavujú technológiu zasklenia, ktorá okrem produkcie elektrickej energie ovplyvňuje potrebu energie na vykurovanie, chladenie budovy a umelé osvetlenie. FV moduly sa integrujú do jednotiek s dvojitém alebo trojitým zasklením (Obr. 4.40), alebo sa používajú ako druhá vrstva na čelné opláštenie fasády. Vďaka flexibilitě pri usporiadaní FV článkov v zasklení je ich možné optimalizovať tak, aby sa dosiahla optimálna úroveň priepustnosti svetla prichádzajúceho do budovy podľa architektonických požiadaviek.

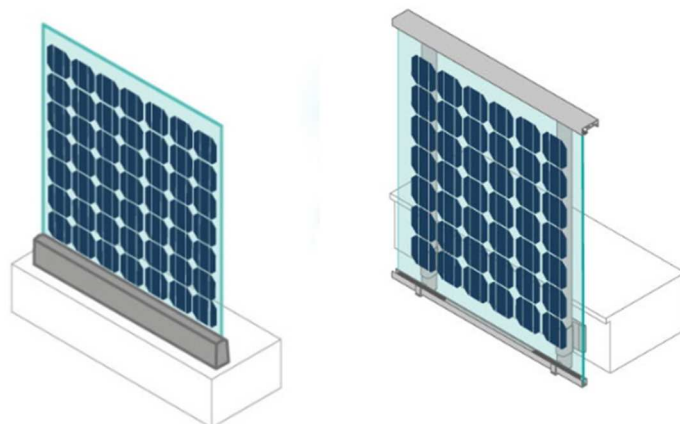


Obr. 4.40 Systémy zasklenia s FV článkami [81]

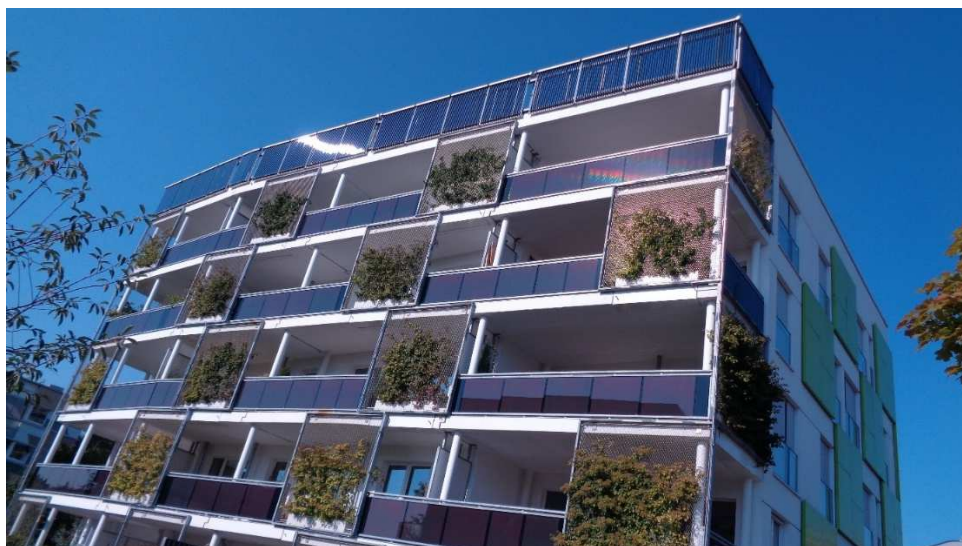
4.8 BIPV balkóny

Balkóny a na nich umiestnené zábradlia často pokrývajú významné plochy v obytných aj administratívnych budovách, čo predstavuje ďalšiu možnosť integrácie BIPV systémov tvorených z polopriehľadných alebo nepriehľadných FV panelov zabudovaných do konštrukcie zábradlia (Obr. 4.41). Ich výhoda sa uplatňuje najmä v mestskom prostredí, kde je priestor na streche obmedzený a na využívanie obnoviteľnej energie je potrebný každý možný povrch budovy. Samozrejme BIPV balkónové zábradlia okrem výroby elektrickej energie plnia aj svoju hlavnú funkciu ako bezpečnostné bariéry. Sú vyrobené tak, aby spĺňali rovnaké bezpečnostné normy ako konvenčné zábradlia, čím sa zaisťuje bezpečnosť a zároveň prispievajú k energetickej účinnosti budovy. Balkónové panely BIPV môžu zabezpečiť aj tienenie vnútorných priestorov budovy, kde blokovaním nadmerného slnečného žiarenia tieto panely znižujú tepelné zisky v priľahlých miestnostiach. Pri BIPV balkónoch je potrebné uvažovať

s povrchovými teplotami, ktoré môžu dosahovať až 70 °C, preto sa odporúča realizovať opatrenia na zníženie rizika popálenia (zábrana, ochrana a pod.).



Obr. 4.41 Systémy zasklenia s FV článkami [82]



Obr. 4.42 BIPV balkónové zábradlia na obytnej budove (Hamburg, Nemecko)

5 Požiarna bezpečnosť BIPV

Požiarna bezpečnosť je dôležitá pri používaní BIPV ako súčasť konštrukcií budov a je nevyhnutné, aby aplikácia BIPV do fasád a striech budov nepriaznivo neovplyvnila bezpečnosť a spoľahlivosť ostatných stavebných prvkov, užívateľov budov a hasičov. BIPV moduly musia spĺňať požiadavky požiarnej bezpečnosti v elektrotechnickom aj stavebnom sektore. Požiare šíriace sa na fasádach môžu v krátkom čase zasiahnuť veľké časti budovy. V posledných desaťročiach sa vyskytlo niekoľko veľkých požiarov vo výškových budovách, spôsobených rozličnými faktormi. Požiarna bezpečnosť je dôležitým aspektom pri vývoji BIPV plášťov budov a je nevyhnutné zabezpečiť, aby používanie integrovaných BIPV modulov ako náhrada

za bežné stavebné materiály nepriaznivo neovplyvnilo riziko vzniku a šírenia požiaru. Vo svojej podstate samotná horľavosť FV nepredstavuje najväčší problém, keďže v samotnom module je horľavá len stredná vrstva fólie uzavretá medzi nehorľavými vrstvami. Na rozdiel od pasívnych fasádnych systémov s obkladovými panelmi FV moduly obsahujú prvky (káble, konektory, spojky a pod.) v rámci elektrického zapojenia, ktoré práve predstavujú potenciálne zdroje vznietenia. Ďalšie aspekty, ako je elektrické vedenie FV káblov a optimalizácia elektrického výkonu, zvyšujú komplexnosť fasádnych systémov BIPV z hľadiska požiarnej bezpečnosti. Najväčším problémom je ľudský faktor (chybná inštalácia) a kvalita komponentov. Realizovať je možné iba certifikované komponenty s požadovanými parametrami, a to na základe technickej dokumentácie (podľa STN EN 62446-1 [83]). Potenciálne nebezpečenstvo vzniku a šírenia požiaru systémov BIPV možno klasifikovať podľa štyroch základných kategórií [84]:

- vznik požiaru od BIPV v dôsledku horúceho bodu (hot-spot), iskrenia, chyby inštalácie, chyby výroby, poškodenia;
- rozšírenie požiaru na iné požiarne úseky, alebo budovy;
- potenciálne riziko ohrozenia požiarom užívateľov budovy;
- možné riziká zasiahnutia elektrickým prúdom pre zasahujúci hasičský a záchranný zbor, kde požiadavky na technické riešenie vypínania solárnych FV napájacích systémov sú uvedené v STN 34 3085 [85].

Súčasný predpis a normy pre elektrické výrobky a stavebné výrobky neriešia všetky problémy požiarnej bezpečnosti, ktoré sa môžu vyskytnúť na fasádach BIPV. Medzinárodná norma IEC 61730–1 a 2 [86,87] obsahuje skúšobné postupy na posúdenie potenciálneho nebezpečenstva vzniku požiaru v dôsledku prevádzky FV modulu, alebo zlyhania jeho komponentov. Bezpečnostné požiadavky pre BIPV moduly na zabránenie vzniku požiaru zahŕňajú aspekty, ako je bezpečnosť proti vznieteniu, ale aj odolnosť modulu pri preťažení nadprúdmi spôsobenými horúcimi miestami a vysokými teplotami v ich bypass diódach. Väčšina testov je založená na štandardných postupoch IEC 61215–2 [88], alebo ISO 11925–2 [89]. Fotovoltické moduly integrované do fasád budov by mali byť navrhnuté s ohľadom na nasledujúce potenciálne požiarne scenáre:

- Požiar sa šíri oknom, uvoľňovaním horúceho dymu a rozšírením plameňa na vonkajšie vrstvy BIPV fasády;
- Požiar prenikne exteriérovou vrstvou a šíri sa vo fasádnej medzere dvojitej BIPV fasády
- Požiar sa šíri z podlažia na podlažie v mieste styku stropnej dosky a BIPV fasády
- Požiar pôsobiaci zvonka (napr. požiar susednej budovy) na BIPV fasádu.

Literatúra

- [1] T. Yang, W. Liu, G. J. Kramer, Q. Sun, Seasonal thermal energy storage: A techno-economic literature review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 139 (2021) 110732. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.110732>.
- [2] Smernica - 2018/2001 - EN - EUR-Lex, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/sk/TXT/?uri=CELEX%3A32018L2001>.
- [3] Ako EÚ podporuje obnoviteľné zdroje energie?, <https://www.europarl.europa.eu/topics/sk/article/20221128STO58001/Ako-Eu-Podporuje-Obnovitelne-Zdroje-Energie?>
- [4] Solar PV and wind supply about 40% of building electricity use by 2030 – Analysis - IEA, <https://www.iea.org/reports/solar-pv-and-wind-supply-about-40-of-building-electricity-use-by-2030>.
- [5] <https://www.wbgu.de/en/>.
- [6] ÚRSO: Podiel „zelenej elektriny“ na celkovej výrobe elektriny v SR je na úrovni 22,90 % | Úrad pre reguláciu sieťových odvetví, <https://www.urso.gov.sk/urso-podiel-zelenej-elektriny-na-celkovej-vyrobe-elektriny-v-sr-je-na-urovni-2290-/>.
- [7] Zákon č. 555/2005 Z. z. o energetickej hospodárnosti budov a o zmene a doplnení niektorých zákonov.
- [8] Návrh - NÁRODNÝ PLÁN ZAMERANÝ NA ZVYŠOVANIE POČTU BUDOV S TAKMER NULOVOU POTREBOU ENERGIE, https://energy.ec.europa.eu/document/download/98310432-f449-4032-88d8-04fe47362ff7_en?Filename=slovak_republic_sk_version.Pdf&prefLang=sk.
- [9] Vyhláška č. 35/2020 Z. z. ktorou sa mení a dopĺňa vyhláška Ministerstva dopravy, výstavby a regionálneho rozvoja SR č. 364/2012 Z. z., ktorou sa vykonáva zákon č. 555/2005 Z. z. o energetickej hospodárnosti budov a o zmene a doplnení niektorých zákonov v znení neskorších predpisov.
- [10] Vyhláška č. 364/2012 Z. z. Slovenskej republiky, Vyhláška Ministerstva dopravy, výstavby a regionálneho rozvoja Slovenskej republiky z 12.novembra 2012, ktorou sa vykonáva zákon č. 555/2005 Z. z. o energetickej hospodárnosti budov a o zmene a doplnení niektorých zákonov v znení neskorších predpisov.
- [11] Vyhláška č. 324/2016 Z. z. Slovenskej republiky, Vyhláška Ministerstva dopravy, výstavby a regionálneho rozvoja Slovenskej republiky z 30.novembra 2016, ktorou sa mení a dopĺňa vyhláška Ministerstva dopravy, výstavby a regionálneho rozvoja Slovenskej republiky č. 364/2012 Z. z., ktorou sa vykonáva zákon č. 555/2005 Z. z. o energetickej hospodárnosti budov a o zmene a doplnení niektorých zákonov v znení neskorších predpisov.
- [12] K. D. Jäger, et al., *Solar energy: fundamentals, technology and systems*, UIT Cambridge, 2016.
- [13] R. Haselhuhn, *Fotovoltaika – Budovy jako zdroj proudu.*, Nakladatelství HEL, 2010.

- [14] B. P. Jelle, C. Breivik, H. Drolsum Røkenes, Building integrated photovoltaic products: A state-of-the-art review and future research opportunities, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 100 (2012) 69–96. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2011.12.016>.
- [15] J. A. Duffie, W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes: Fourth Edition*, Solar Engineering of Thermal Processes: Fourth Edition (2013). <https://doi.org/10.1002/9781118671603>.
- [16] J. H. C. Hendricks, The option of phase change materials as temperature regulation for building integrated photovoltaics, (2010). <https://studenttheses.uu.nl/handle/20.500.12932/5813>.
- [17] B. P. Jelle, Building Integrated Photovoltaics: A Concise Description of the Current State of the Art and Possible Research Pathways, *Energies* 2016, Vol. 9, Page 21 9 (2015) 21. <https://doi.org/10.3390/EN9010021>.
- [18] Best Research-Cell Efficiency Chart | Photovoltaic Research | NREL, (n.d.). <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>.
- [19] STN 33 2000-7-712: 2022 Elektrické inštalácie nízkeho napätia. Časť 7-712: Požiadavky na osobitné inštalácie alebo priestory. Fotovoltické (PV) systémy. November 2022.
- [20] <https://solaro.sk/p/solarny-predlzovaci-kabel-4mm%C2%B2-s-mc4-konektormi/>.
- [21] <https://www.slocable.com.cn/sk/solar-panel-wiring-diagram/>.
- [22] <https://solaro.sk/p/rozvodna-skrina-pv-1000-dc-ac-2-stringy-skridla>.
- [23] Úrad pre reguláciu sieťových odvetví. Porovnanie podpory OZE a výkupných cien elektriny vyrobenej z OZE v okolitých krajinách. Odbor monitoringu a analýz, Martin, júl 2016.
- [24] Vyhláška č. 18/2017 Z. z. ktorou sa ustanovuje cenová regulácia v elektroenergetike a niektoré podmienky vykonávania regulovaných činností v elektroenergetike.
- [25] Vyhláška č. 18/2017 Z. z. Slovenskej republiky, Vyhláška Úradu pre reguláciu sieťových odvetví z 8. februára 2017, ktorou sa ustanovuje cenová regulácia v elektroenergetike a niektoré podmienky vykonávania regulovaných činností v elektroenergetike.
- [26] ZSE Fotovolt Štandard 4 kW | ZSE, <https://www.zse.sk/produkty/fotovoltika/zse-fotovolt-standard-4-kw>.
- [27] JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission, (n.d.). https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/.
- [28] Fotovoltika na strechách – Krytina.sk, <https://krytina.sk/magazin/novostavba/fotovoltika-na-strechach>.
- [29] <https://solaro.sk/p/nosna-konstrukcia-pre-20-panelov-na-sikmu-strechu-zo-skridle/>.
- [30] J. Benemann, O. Chehab, E. Schaar-Gabriel, Building-integrated PV modules, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 67 (2001) 345–354. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(00\)00302-0](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(00)00302-0).

- [31] Fasáda školy vyrába elektrinu zo slnečných lúčov | iStavebnictvo.sk, (n.d.). <https://www.istavebnictvo.sk/clanky/fasada-skoly-vyraba-elektrinu-zo-slnecnych-lucov>.
- [32] B. P. Jelle, C. Breivik, H. Drolsum Røkenes, Building integrated photovoltaic products: A state-of-the-art review and future research opportunities, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 100 (2012) 69–96. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2011.12.016>.
- [33] E. Skoplaki, J. A. Palyvos, On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations, *Solar Energy* 83 (2009) 614–624. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2008.10.008>.
- [34] International Energy Agency (IEA), Potential for Building Integrated Photovoltaics. IEA: Ursen, Switzerland, 2002; p. 1–12.
- [35] P. R. Defaix, W. G. J. H. M. van Sark, E. Worrell, E. de Visser, Technical potential for photovoltaics on buildings in the EU-27, *Solar Energy* 86 (2012) 2644–2653. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2012.06.007>.
- [36] A. G. Imenes, D. R. Mills, Spectral beam splitting technology for increased conversion efficiency in solar concentrating systems: a review, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 84 (2004) 19–69. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2004.01.038>.
- [37] O. Dupré, R. Vaillon, M. A. Green, Thermal behavior of photovoltaic devices: Physics and engineering, *Thermal Behavior of Photovoltaic Devices: Physics and Engineering* (2016) 1–130. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-49457-9/COVER>.
- [38] O. Dupré, Physics of the thermal behaviour of photovoltaic devices. Ph.D. Thesis, INSA de Lyon, 2015.
- [39] Integrácia fotovoltaických systémov do budov | ASB.sk, <https://www.asb.sk/stavebnictvo/technicke-zariadenia-budov/integracia-fotovoltaickych-systemov-do-budov>.
- [40] Najlepšia orientácia a sklon fotovoltických panelov | embu.sk, <https://www.embu.sk/solarna-energia/najlepsia-orientacia-a-sklon-fotovoltickych-panelov/>. (n.d.).
- [41] IEC 63092-1:2020 Photovoltaics in buildings - Part 1: Requirements for building-integrated photovoltaic modules.
- [42] EN 50583-1 Photovoltaics in buildings - Part 1: BIPV modules, January 2016.
- [43] NARIADENIE EURÓPSKEHO PARLAMENTU A RADY (EÚ) č. 305/2011 z 9. marca 2011, ktorým sa ustanovujú harmonizované podmienky uvádzania stavebných výrobkov na trh a ktorým sa zrušuje smernica Rady 89/106/EHS.
- [44] SMERNICA EURÓPSKEHO PARLAMENTU A RADY 2006/95/ES z 12. decembra 2006 o harmonizácii právnych predpisov členských štátov týkajúcich sa elektrického zariadenia určeného na používanie v rámci určitých limitov napätia.
- [45] EN 50583-2 Photovoltaics in buildings - Part 2: BIPV systems, January 2016.
- [46] K. Berger, et al., International definitions of “BIPV”, IEA PVPS Task 15 Subtask C – International framework for BIPV specifications Report IEA-PVPS T15-04: 2018 August 2018.

- [47] Guide to Sustainable Building Certifications, Published by Sbi and GXN, 2018, ISBN: 978-87-563-1881-5.
- [48] G. Y. Yun, M. McEvoy, K. Steemers, Design and overall energy performance of a ventilated photovoltaic façade, *Solar Energy* 81 (2007) 383–394. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2006.06.016>.
- [49] Photovoltaik Fassaden: Leitfaden zur Planung. LITHODECOR Innovative Fassadensysteme, 2016, DAW SE und GWT-TUD GmbH, ISBN: 978-3-86780-463-9.
- [50] <https://www.3s-solar.swiss/blog/anforderungen-brandschutz>.
- [51] G. Y. Yun, M. McEvoy, K. Steemers, Design and overall energy performance of a ventilated photovoltaic façade, *Solar Energy* 81 (2007) 383–394. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2006.06.016>.
- [52] Z. Nagy, B. Svetozarevic, P. Jayathissa, M. Begle, J. Hofer, G. Lydon, A. Willmann, A. Schlueter, The Adaptive Solar Facade: From concept to prototypes, *Frontiers of Architectural Research* 5 (2016) 143–156. <https://doi.org/10.1016/J.FOAR.2016.03.002>.
- [53] <https://www.ertex-solar.at/>.
- [54] <https://www.schueco.com/>.
- [55] T. E. Kuhn, C. Erban, M. Heinrich, J. Eisenlohr, F. Ensslen, D. H. Neuhaus, Review of technological design options for building integrated photovoltaics (BIPV), *Energy Build* 231 (2021) 110381. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2020.110381>.
- [56] <https://www.3s-solar.swiss/bildergalerie>.
- [57] T. Yang, A. K. Athienitis, A review of research and developments of building-integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 66 (2016) 886–912. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.07.011>.
- [58] A. K. Athienitis, J. Bambara, B. O'Neill, J. Faille, A prototype photovoltaic/thermal system integrated with transpired collector, *Solar Energy* 85 (2011) 139–153. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2010.10.008>.
- [59] Z. Hu, W. He, J. Ji, D. Hu, S. Lv, H. Chen, Z. Shen, Comparative study on the annual performance of three types of building integrated photovoltaic (BIPV) Trombe wall system, *Appl Energy* 194 (2017) 81–93. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2017.02.018>.
- [60] J. Peng, L. Lu, H. Yang, An experimental study of the thermal performance of a novel photovoltaic double-skin facade in Hong Kong, *Solar Energy* 97 (2013) 293–304. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2013.08.031>.
- [61] X. Xu, S. Van Dessel, Evaluation of a prototype active building envelope window-system, *Energy Build* 40 (2008) 168–174. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2007.02.027>.
- [62] Y. Luo, L. Zhang, Z. Liu, Y. Wang, F. Meng, J. Wu, Thermal performance evaluation of an active building integrated photovoltaic thermoelectric wall system, *Appl Energy* 177 (2016) 25–39. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2016.05.087>.

- [63] M. S. Penaranda Moren, A. Korjenic, Green buffer space influences on the temperature of photovoltaic modules: Multifunctional system: Building greening and photovoltaic, *Energy Build* 146 (2017) 364–382. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2017.04.051>.
- [64] [http://editors.eol.org/eoearth/wiki/Telkes,_Maria_\(Energy\)](http://editors.eol.org/eoearth/wiki/Telkes,_Maria_(Energy)).
- [65] R. K. Sharma, P. Ganesan, V. V. Tyagi, H. S. C. Metselaar, S. C. Sandaran, Developments in organic solid–liquid phase change materials and their applications in thermal energy storage, *Energy Convers Manag* 95 (2015) 193–228. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2015.01.084>.
- [66] <https://www.rubitherm.eu/en/index.php/productcategory/organische-pcm-rt>.
- [67] T. Ma, H. Yang, Y. Zhang, L. Lu, X. Wang, Using phase change materials in photovoltaic systems for thermal regulation and electrical efficiency improvement: A review and outlook, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 43 (2015) 1273–1284. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.12.003>.
- [68] M. C. Browne, B. Norton, S. J. McCormack, Phase change materials for photovoltaic thermal management, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 47 (2015) 762–782. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.03.050>.
- [69] M. J. Huang, The application of computational fluid dynamics (CFD) to predict the thermal performance of phase change materials for the control of photovoltaic cell temperature in buildings. Doktorská dizertačná práca, júl 2002, Faculty of Engineering and Build Environment, University of Ulster.
- [70] S. Horn, Bauwerkintegrierte Photovoltaik (BIPV), Entwicklung und Bewertung von Fassadensystemen. Doktorská dizertačná práca, August 2017, Institut für Baukonstruktion, Fakultät Bauingenieurwesen, Technische Universität Dresden.
- [71] P. H. Biwole, P. Eclache, F. Kuznik, Phase-change materials to improve solar panel's performance, *Energy Build* 62 (2013) 59–67. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2013.02.059>.
- [72] J. H. C. Hendricks, W. G. J. H. M. Van Sark, Annual performance enhancement of building integrated photovoltaic modules by applying phase change materials, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 21 (2013) 620–630. <https://doi.org/10.1002/PIP.1240>.
- [73] C. S. Malvi, D. W. Dixon-Hardy, R. Crook, Energy balance model of combined photovoltaic solar-thermal system incorporating phase change material, *Solar Energy* 85 (2011) 1440–1446. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2011.03.027>.
- [74] <https://solargaps.com/>.
- [75] B. Svetozarevic, M. Begle, P. Jayathissa, S. Caranovic, R. F. Shepherd, Z. Nagy, I. Hischer, J. Hofer, A. Schlueter, Dynamic photovoltaic building envelopes for adaptive energy and comfort management, *Nature Energy* 2019 4:8 4 (2019) 671–682. <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0424-0>.

- [76] J. Ji, J. P. Lu, T. T. Chow, W. He, G. Pei, A sensitivity study of a hybrid photovoltaic/thermal water-heating system with natural circulation, *Appl Energy* 84 (2007) 222–237. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2006.04.009>.
- [77] T. T. Chow, A. L. S. Chan, K. F. Fong, Z. Lin, W. He, J. Ji, Annual performance of building-integrated photovoltaic/water-heating system for warm climate application, *Appl Energy* 86 (2009) 689–696. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2008.09.014>.
- [78] S. Cheng, Curved Photovoltaic Surface Optimization for BIPV: An Evolutionary Approach Based on Solar Radiation Simulation, Bartlett School of Graduate Studies University College London, 2009.
- [79] M. Chen, W. Zhang, L. Xie, B. He, W. Wang, J. Li, Z. Li, Improvement of the electricity performance of bifacial PV module applied on the building envelope, *Energy Build* 238 (2021) 110849. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2021.110849>.
- [80] R. Hezel, Novel applications of bifacial solar cells, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 11 (2003) 549–556. <https://doi.org/10.1002/PIP.510>.
- [81] MET PV IGU | BIPV Manufacturer Metsolar EU. <https://metsolar.eu/products/pv-igu-insulated-glass-units/>.
- [82] Photovoltaic Balcony – EnergyGlass. <https://energyglass.gruppostg.com/en/photovoltaic-elements/photovoltaic-balcony.html>.
- [83] STN EN 62446-1: Fotovoltické (PV) systémy. Požiadavky na skúšanie, dokumentáciu a údržbu. Časť 1: Systémy pripojené na rozvodnú sieť. Dokumentácia, skúšky pri uvádzaní do prevádzky a prehliadka. Apríl 2024.
- [84] R. Yang, Y. Zang, J. Yang, R. Wakefield, K. Nguyen, L. Shi, B. Trigunarsyah, F. Parolini, P. Bonomo, F. Frontini, D. Qi, Y. Ko, X. Deng, Fire safety requirements for building integrated photovoltaics (BIPV): A cross-country comparison, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 173 (2023) 113112. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2022.113112>.
- [85] STN 34 3085: Pravidlá na zaobchádzanie s elektrickým zariadením pri požiaroch alebo zátopách. Január 2016.
- [86] IEC 61730-1:2023 Photovoltaic (PV) module safety qualification - Part 1: Requirements for construction.
- [87] IEC 61730-2:2023 Photovoltaic (PV) module safety qualification - Part 2: Requirements for testing.
- [88] IEC 61215-2:2021 Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval - Part 2: Test procedures.
- [89] ISO 11925-2:2020 Reaction to fire tests — Ignitability of products subjected to direct impingement of flame Part 2: Single-flame source test.

Ing. Jakub Čurpek, PhD.

INTEGROVANÉ FOTOVOLTICKÉ FASÁDY BUDOV

Vydala Slovenská technická univerzita v Bratislave vo Vydavateľstve SPEKTRUM STU, Bratislava, Vazovova 5, v roku 2025.

Edícia skrípt

Rozsah 75 strán, 77 obrázkov, 2 tabuľky, 6,573 AH, 6,718 VH, 1. vydanie, edičné číslo 6224.

85 – 206 – 2025

ISBN 978-80-227-5487-3
DOI: 10.61544/FWDW3261