

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I
BRODOGRADNJE

DOKTORSKI STUDIJ STROJARSTVA

KVALIFIKACIJSKI DOKTORSKI ISPIT

TEHNIKE PASIVNOG HLAĐENJA SILICIJSKIH FOTONAPONSKIH
PANELA PRIMJENOM MATERIJALA S FAZNOM PROMJENOM

Ivan Čorić

Split, rujan 2025.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. FPM MATERIJALI U PASIVNOM HLAĐENJU FN PANELA: SVOJSTVA, POBOLJŠANJA I KOMPATIVNA ANALIZA	5
3.1. Jednoslojna FN-FPM konfiguracija s čistim FPM-om	16
3.2. Jednoslojna FN-FPM konfiguracija s dodacima	20
3.3. Jednoslojna FN-FPM konfiguracija s pjenom	21
3.4. Višeslojna FN-FPM konfiguracija	23
3.5. FN-FPM konfiguracija s TEC-om, RC-om ili termosifonom	26
3.6. FN-FPM konfiguracija s FPM-om u cijevima	29
3.7. FN-FPM konfiguracija s rebrima	30
3.7.1. FN-FPM konfiguracija s unutarnjim rebrima	31
3.7.2. FN-FPM konfiguracija s vanjskim rebrima	33
3.7.3. FN-FPM konfiguracija s unutarnjim i vanjskim rebrima.....	34
4. ANALIZA RAZLIČITIH FN-FPM KONFIGURACIJA U KONTEKSTU TOPLINSKE REGULACIJE I ENERGETSKE UČINKOVITOSTI	38
5. EKONOMSKI I OKOLIŠNI ASPEKT FN-FPM PASIVNIH KONFIGURACIJA HLAĐENJA	47
6. RASPRAVA O KLJUČNIM REZULTATIMA	50
7. ZAKLJUČCI I SMJERNICE ZA BUDUĆA ISTRAŽIVANJA	54
LITERATURA	56
POPIS OZNAKA I KRATICA	64
SAŽETAK	65

1. UVOD

Nužnost ublažavanja klimatskih promjena nikada nije bila važnija, što pokazuje nedavni porast globalnih emisija ugljičnog dioksida (CO₂). U 2024. godini zabilježen je porast emisija CO₂ povezanih s korištenjem energije za 0,8 %, dosegnuvši rekordnu razinu od 37,8 gigatona (Gt) [1]. Ovaj alarmantni porast naglašava hitnu potrebu za ambicioznijim mjerama zaštite klime i odlučnim djelovanjem. Ključni formalni dokument za upravljanje klimatskim promjenama je Pariški sporazum, sklopljen 2015. godine nakon opsežnih međunarodnih pregovora. Sporazum postavlja cilj globalne ugljične neutralnosti do 2050. godine, što zahtijeva duboku energetske tranziciju. Ova tranzicija nužna je za upravljanje klimatskom krizom i ograničavanje globalnog porasta temperature na 1,5 °C iznad razina zabilježenih prije industrijalizacije [2]. Porast emisija CO₂ naglašava jaz između trenutnih politika i ciljeva Pariškog sporazuma te ističe potrebu za ubrzanim i učinkovitijim klimatskim strategijama.

Ključna komponenta za postizanje klimatskih ciljeva je zelena tranzicija, proces transformacije usmjeren na prelazak ekonomije s ovisnosti o fosilnim gorivima na održive prakse. Ova tranzicija postala je važan aspekt globalnih gospodarskih strategija, pri čemu je povećanje udjela tehnologija obnovljivih izvora energije presudno [3]. Obnovljivi izvori energije poput solarne, vjetro i hidroenergije ključni su za zelenu tranziciju. Ova tranzicija od presudne je važnosti za smanjenje ugljičnog otiska i poboljšanje energetske sigurnosti. Prema recentnim studijama i podacima, navedene tehnologije igraju centralnu ulogu u postizanju održive ekološke otpornosti i ostvarivanju globalnih ciljeva smanjenja emisija. U 2024. godini studije i izvješća naglašavaju značajan utjecaj napretka u obnovljivoj energiji. Globalna godišnja instalacija obnovljivih izvora energije dosegla je oko 700 gigavata (GW), što predstavlja najveći rast u posljednja dva desetljeća i novi rekord 22. godinu zaredom [4]. Fotonaponski (FN) sustavi imali su izvanrednu godinu s globalno instaliranim kapacitetom od 451,9 GW, u usporedbi s 352,7 GW u 2023. godini [5]. Također je zabilježen značajan napredak u vjetroenergiji, s 12,2 GW novoinstaliranog kapaciteta u 2024., uključujući 1,7 GW kapaciteta na moru, što se odnosi na zemlje članice Europske unije. [6]. Ovi rezultati naglašavaju ključni doprinos tehnologija obnovljivih izvora energije zelenoj tranziciji i njihovu bitnu ulogu u postizanju održivih energetske ciljeva.

Solarna energija široko je priznata zbog svog energetskog potencijala i rasprostranjenosti kao obnovljivog izvora, čineći je kritičnom komponentom tranzicije prema održivom energetskom sustavu [7]. Kako globalna zajednica sve više traži alternative fosilnim gorivima, razvoj i primjena tehnologija obnovljivih izvora energije znatno se ubrzao. Među tim tehnologijama, fotonaponski (FN) sustavi istaknuli su se kao ključni element u prijelazu na zelenije energetske solucije. FN sustavi iskorištavaju solarnu energiju tako da sunčeva svjetlost direktno pretvaraju u električnu energiju pomoću solarnih ćelija. Među različitim tipovima FN tehnologija, sustavi bazirani na siliciju najrašireniji su i najčešće korišteni [8]. Unatoč znatnom napretku u tim tehnologijama, poboljšanje energetske učinkovitosti silicijskih FN panela i dalje predstavlja veliki izazov. Trenutno je konverzijska učinkovitost komercijalnih silicijskih FN panela tipično između 10 i 20 % pod standardnim testnim uvjetima [9]. To znači da se samo mali dio solarne energije apsorbira od strane FN panela pretvara u uporabnu električnu energiju, dok se ostatak prvenstveno gubi u obliku topline. Nadalje, problem se dodatno pogoršava činjenicom da učinkovitost silicijskih FN panela obično opada za 0,4–0,5 % za svaki porast temperature ćelije od 1 °C, što dodatno otežava poboljšanje njihove ukupne performanse [8].

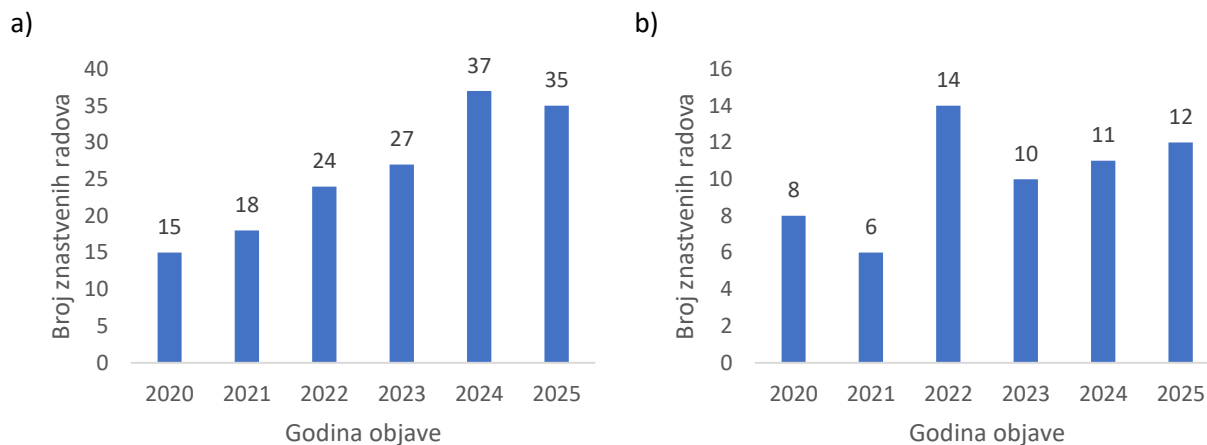
Kako bi se prevladali ovi izazovi, razvijene su inovativne tehnike hlađenja FN panela. Istraživane su i aktivne i pasivne metode hlađenja kako bi se smanjili negativni učinci povišenih temperatura na električnu učinkovitost panela [10]. Aktivne metode hlađenja uključuju upotrebu vanjskih mehanizama poput ventilatora [11], [12] ili sustava tekućinskog hlađenja [13], [14] za učinkovitije odvođenje topline. Pasivne metode hlađenja, s druge strane, koriste dizajnerska poboljšanja i materijale koji prirodno disipiraju toplinu bez dodatnog utroška energije. Pasivne metode hlađenja općenito se dijele u tri glavne vrste [15]. Prva vrsta je zračno pasivno hlađenje, koje poboljšava prirodnu konvekciju kroz komponente poput rashladnih tijela i rebrastih struktura [16]. Druga vrsta je čvrsto pasivno hlađenje, koje koristi materijale s faznom promjenom (FPM) [17] koji apsorbiraju i oslobađaju toplinsku energiju tijekom prijelaza između različitih stanja. Treća vrsta je termalno hlađenje, koje uključuje tehnologije poput termoelektričnih generatora (TEG) [18] i termosifona [19] koji koriste temperaturne gradijente za učinkovito upravljanje toplinom.

Integracija FPM-a u FN panele prvi je istraživao Stultz i Wen 1978. godine, predstavljajući pionirski pristup povećanju učinkovitosti proizvodnje električne energije pasivnim hlađenjem [20]. Ova metoda imala je za cilj smanjenje gubitaka učinkovitosti uzrokovanih visokim radnim temperaturama FN sustava korištenjem jedinstvenih toplinskih svojstava FPM-a. FPM-ovi su materijali koji prolaze kroz fazne prijelaze, obično između čvrstog i tekućeg stanja, tijekom kojih apsorbiraju i emitiraju toplinsku energiju [21]. Kroz ovu faznu promjenu, FPM-ovi mogu djelovati kao toplinski „pufer“ i pomoći u održavanju temperature FN panela unutar optimalnog raspona rada, čime se smanjuju negativni učinci povišenih temperatura na performanse. Osim toga, pasivni sustavi hlađenja temeljeni na FPM-u imaju nekoliko značajnih prednosti. Ti sustavi učinkovito reguliraju temperaturu FN panela i nude visoke stope apsorpcije topline uz minimalnu potrošnju materijala. Djeluju bez potrošnje električne energije i bez pokretnih dijelova, čime se uklanjaju zahtjevi za održavanjem i troškovi rada [22]. Ove karakteristike čine sustave hlađenja temeljenim na FPM-u atraktivnim, ekonomičnim rješenjem za poboljšanje održivosti i performansi FN sustava.

Ovaj sveobuhvatni pregled motiviran je značajnim napretkom i rastućim interesom za pasivne strategije hlađenja silicijskih FN panela, osobito korištenjem FPM-a, s krajnjim ciljem poboljšanja energetske učinkovitosti i dugovječnosti. Sveobuhvatni pregled [23] objavljen 2016. godine istaknuo je različite pasivne tehnike hlađenja, poput sustava s toplinskim cijevima i rebrastih hladnjaka, ali nije obuhvatio FPM. Od tada su dvije nedavne studije fokusirane na primjenu FPM-a za pasivno hlađenje FN panela. Međutim, jedna od tih studija [24] bila je usmjerena na fotonaponsko/toplinske (FN/T) sustave, dok je druga [10] proučavala koncentrirane fotonaponske (CFN) sustave, što oboje izlazi iz okvira ovog pregleda. Naknadni pregledi [25], [26] razmatrali su i aktivne i pasivne metode hlađenja te spomenuli FPM kao opciju hlađenja FN panela, no nisu detaljno elaborirali pasivno hlađenje pomoću FPM-a. To ukazuje na prazninu u literaturi, jer nijedan sveobuhvatan pregled u posljednjih šest godina nije obuhvatio pasivno hlađenje FN panela s FPM-om. Ova praznina naglašava potrebu za daljnjim ciljanom analizom ove teme, što je glavni cilj ovog pregleda.

Za ovaj pregled relevantni radovi identificirani su pretragom baze Scopus® koristeći ključne riječi poput: „photovoltaic“, „PV“, „phase change material“, „PCM“ i „passive cooling“. Slika

1.1a prikazuje godišnji broj publikacija pronađenih u Scopus®, dok slika 1.1b ilustrira podskup publikacija uključenih u ovaj pregled. Naime, studije koje su se bavile CRTFN sustavima, FN/T sustavima ili fotonaponskim panelima s praćenjem Sunca isključene su kako bi se osiguralo da se pregled fokusira isključivo na FN-FPM pasivne sustave hlađenja.



Slika 1.1. Broj publikacija po godini prema bazi podataka Scopus (a), godišnji broj publikacija o pasivnom hlađenju s FPM-om za FN panele na bazi silicija (b).

2. FPM MATERIJALI U PASIVNOM HLAĐENJU FN PANELA: SVOJSTVA, POBOLJŠANJA I KOMPARATIVNA ANALIZA

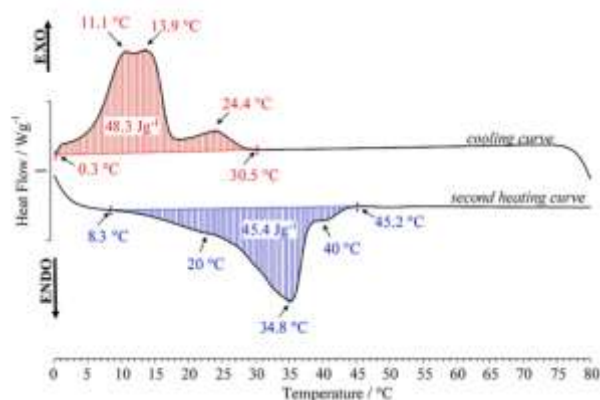
Materijali s faznom promjenom (FPM) specijalizirani su materijali koji tijekom prijelaza iz jedne faze u drugu – najčešće iz krutog u tekuće stanje i obrnuto – mogu apsorbirati i oslobađati velike količine toplinske energije pri gotovo konstantnoj temperaturi [27]. Upravo ta sposobnost čini ih izuzetno vrijednima u sustavima upravljanja toplotom, jer omogućuju pohranu topline kada je ona dostupna i njezino oslobađanje kada je potrebna, održavajući tako stabilniju radnu temperaturu različitih sustava i uređaja. FPM-ovi se najčešće dijele u tri osnovne skupine: organske, anorganske i eutektičke [28]. Svaka skupina ima svoje prednosti i ograničenja koja ih čine pogodnima za različite primjene.

Organski FPM-ovi, poput parafina i masnih kiselina, cijenjeni su zbog svojstava kao što su kemijska stabilnost, otpornost na koroziju i visoka sposobnost pohrane latentne topline. Osim toga, imaju relativno stalne točke taljenja i mali rizik od fazne segregacije tijekom dugotrajnog cikličkog zagrijavanja i hlađenja. Njihov najveći nedostatak je ipak niska toplinska vodljivost, koja može ograničiti brzinu prijenosa topline i smanjiti ukupnu učinkovitost sustava u kojima se primjenjuju [29].

Anorganski FPM-ovi, poput hidraiziranih soli i metalnih legura [30], poznati su po visokoj toplinskoj vodljivosti i velikoj sposobnosti pohranjivanja latentne topline, često većoj nego kod organskih materijala. Osim toga, obično su i cjenovno povoljniji. Međutim, njihovoj primjeni otežavaju problemi poput pothlađivanja (supercooling), kada materijal ostaje u tekućem stanju i ispod temperature očvršćivanja, te korozivnost, koja može ugroziti dugotrajnu stabilnost i pouzdanost sustava [28].

Eutektički FPM-ovi predstavljaju kombinaciju organskih i anorganskih komponenti s ciljem postizanja ravnoteže između željenih svojstava. Njihova prednost je što se talište i očvršćivanje mogu precizno podesiti na niže temperature od pojedinačnih sastojaka, čime se postiže bolja kontrola toplinskog upravljanja [31]. Zahvaljujući kombinaciji, često imaju dobro definirane točke taljenja i relativno visoku toplinsku vodljivost. Ipak, i oni su skloni uobičajenim problemima poput niske vodljivosti, korozije, pothlađivanja i fazne segregacije [31].

U tablici 2.1 dan je detaljan pregled FPM-ova koji su u posljednjih šest godina korišteni u sustavima pasivnog hlađenja FN panela. Prikazane su njihove ključne karakteristike poput temperature taljenja, latentne topline, gustoće, toplinske vodljivosti, specifičnog toplinskog kapaciteta, viskoznosti i koeficijenta toplinskog širenja. Cjelovita dokumentacija svojstava FPM-ova nužna je za istraživače koji iste materijale koriste u numeričkim simulacijama, kako bi modeli bili vjerodostojni i precizni. U praksi se često temperatura taljenja prikazuje kao jedna vrijednost, što ne odražava stvarni proces fazne promjene, koji se odvija unutar određenog temperaturnog intervala. Primjerice, na slici 2.1 prikazano je da se topljenje svinjske masti, organskog FPM-a, započinje već pri 8,3 °C i traje sve do 45,2 °C, pri čemu je vrhunac procesa zabilježen na 34,8 °C. Stoga nije dovoljno uzeti samo tu vršnu vrijednost kao jedinu točku taljenja. Sličan temperaturni raspon uočava se i tijekom faze očvršćivanja.



Slika 2.1. Prikaz rezultata diferencijalne skenirajuće kalorimetrije (DSC) svinjske masti [32].

Osim toga, iz tablice 2.1 vidljivo je da značajan dio podataka potječe iz objavljenih izvora i nije dobiven izravnim eksperimentalnim mjerenjima. Većina ovih informacija dolazi iz baza podataka koje pružaju proizvođači FPM-ova. Međutim, usporedba pokazuje značajnu razliku: u istraživanju [33] izmjerena toplinska vodljivost FPM-a RT28HC iznosi $0,326 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, dok proizvođač navodi vrijednost od $0,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Ova devijacija od približno 63 % ističe moguću varijabilnost između specifikacija proizvođača i stvarno izmjerenih vrijednosti. Takve razlike naglašavaju važnost izravnog mjerenja toplinskih svojstava kad god je to moguće, jer oslanjanje isključivo na podatke proizvođača može ne odražavati stvarne performanse materijala. Neovisna provjera ključna je za pouzdanost i točnost procjene toplinskih svojstava.

Jedan od izazova povezanih s organskim FPM-ovima, poput parafina, jest njihova moguća degradacija tijekom vremena, što može značajno utjecati na njihovo ponašanje pri faznoj promjeni i ukupnu učinkovitost. Organski FPM-ovi podložni su toplinskoj i kemijskoj nestabilnosti, što može dovesti do promjena u sastavu materijala i smanjenja sposobnosti apsorpcije i oslobađanja topline. Ovo je posebno važno za dugoročne primjene, gdje sposobnost FPM-a da zadrži kapacitet pohrane topline može postupno opadati. Prema izvještaju [34], organski FPM-ovi tijekom dugog vremenskog razdoblja mogu doživjeti raspad, što dovodi do promjena latentne topline i toplinske vodljivosti. Takva degradacija može smanjiti učinkovitost FPM-a i posljedično utjecati na performanse cijelog sustava pohrane toplinske energije. Stoga je osiguranje dugoročne stabilnosti ovih materijala ključno za njihovu praktičnu primjenu, a dodatna istraživanja su potrebna kako bi se razvili stabilniji organski FPM-ovi ili alternative za ublažavanje ovih problema.

Tablica 2.1. FPM korišteni za pasivno hlađenje FN panela i njihova svojstva

Ref.		FPM	Temperatura taljenja (°C)		Latentna toplina (kJ·kg ⁻¹)		Gustoća (kg·m ⁻³)	Toplinska vodljivost (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Specifični toplinski kapacitet (kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	Viskoznost (kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	Koeficijent toplinskog širenja (K ⁻¹)	
				C/M		C/M						
ORGANSKI	[19]	Parafinski vosak	47	C	266	C	818 (kruto) 760 (tekuće)	0,24	2,95 (kruto) 2,51 (tekuće)	N/D	N/D	
	[22]		N/D									
	[35]		20	C	190	C	880 (kruto) 770 (tekuće)	0,2	2,0	N/D	1,0·10 ⁻³	
	[36]		28	C	222	C	N/D	0,2	2,0	N/D	N/D	
	[37]		33-46 Vrhunac:42°C	M	141	M	818 (kruto) 760 (tekuće)	0,2 (tekuće)	2,21 (kruto) 2,95 (tekuće)	N/D	N/D	
	[38]		40-44	C	190	C	930 (kruto) 830 (tekuće)	0,21	2,1	N/D	N/D	
	[39]		43	C	189	C	910 (kruto) 765 (tekuće)	0,23 (kruto) 0,21 (tekuće)	2,84 (kruto) 2,54 (tekuće)	N/D	N/D	
	[40]		50	C	189	C	910	0,21	N/D	N/D	N/D	
	[41]		65	C	70	C	894	0,2	2,9 (kruto)	6,0·10 ⁻³	N/D	

								2,2 (tekuće)		
[42], [43]	Parafinski vosak (potpuno rafiniran)	47-63,6 Vrhunac: 59°C	M	154	M	880 (kruto) 760 (tekuće)	0,16 na 20°C	2,18 (kruto) 2,39 (tekuće)	N/D	N/D
[44]	RT28HC	25-29	C	250	C	N/D	0,2	2,0	N/D	N/D
[45]	RT28HC	27-29	C	250	C	880 (kruto) 770 (tekuće)	0,2	2,0	N/D	N/D
[46]	RT42	38-43	C	165	C	N/D	0,2	2,0	N/D	N/D
[47]	RT42	38-43	C	165	C	880 (kruto) 760 (tekuće)	0,2	2,0	N/D	N/D
[48]	RT44	43	C	250	C	750	0,2	2,0	N/D	N/D
[49]	RT44	41-44	C	250	C	800 (kruto) 700 (tekuće)	0,2	2,0	N/D	N/D
[50]	RT47	46	C	160	C	880 (kruto) 770 (tekuće)	0,2	2,0	N/D	N/D
[51]	RT21	20-23	C	190	C	880 (kruto) 770 (tekuće)	0,2	2,0	N/D	N/D
	RT35	34-36	C	240	C	880 (kruto) 770 (tekuće)	0,2	2,0	N/D	N/D
	RT44	43-44	C	250	C	880 (kruto) 770 (tekuće)	0,2	2,0	N/D	N/D
[52]	RT25	26,6	C	180	C	830	0,19 (kruto) 0,18 (tekuće)	1,99 (kruto) 2,11 (tekuće)	N/D	N/D
	RT31	31	C	140	C	820	0,2	2,0	N/D	N/D
	RT42	41	C	135	C	832	0,2	2,0	N/D	N/D
[53]	RT35HC	34	C	240	C	880 (kruto) 770 (tekuće)	0,2	2,0	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$7,6 \cdot 10^{-4}$
[54]		34	C	220	C	778,2	0,2	2,0	$4,4 \cdot 10^{-3}$	$8,65 \cdot 10^{-4}$
[55]	RT28HC	27-29	C	250	C	880 (kruto) 770 (tekuće)	0,2	2,0	N/D	N/D
	RT35HC	34-36	C	240	C	880 (kruto) 770 (tekuće)	0,2	2,0	N/D	N/D

	[56]	RT35HC	34-36	C	240	C	880 (kruto) 770 (tekuće)	0,2	2,0	N/D	N/D
		RT44HC	41-44	C	250	C	880 (kruto) 770 (tekuće)	0,2	2,0	N/D	N/D
	[57]	PT29	29	C	202	C	940 (kruto) 850 (tekuće)	0,25 (kruto) 0,15 (tekuće)	1,77 (kruto) 1,94 (tekuće)	$8,0 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$
	[58]	PT48	48	C	230	C	900 (kruto) 820 (tekuće)	0,25 (kruto) 0,15 (tekuće)	2,1 (kruto) 2,27 (tekuće)	N/D	N/D
		PT58	58	C	225	C	890 (kruto) 810 (tekuće)	0,25 (kruto) 0,15 (tekuće)	2,47 (kruto) 2,71 (tekuće)	N/D	N/D
	[59]	OM47	48	C	196	C	917 (kruto) 880 (tekuće)	0,2 (kruto) 0,1 (tekuće)	2,5 (kruto) 2,7 (tekuće)	N/D	N/D
	[60]	OM37	38	C	186	C	973 (kruto) 860 (tekuće)	0,16	2,55	N/D	N/D
		OM42	44	C	190	C	903 (kruto) 863 (tekuće)	0,19	2,71	N/D	N/D
	[61]	Polietilen glikol 1000	35-40	C	N/D		1101	N/D	N/D	N/D	N/D
	[62]	Polietilen glikol 1500	38,4- nedefinirano Vrhunac: 43,1°C	M	178,4	M	1270	0,234	1,95-2,4	0,125	N/D
	[63]	n-Heksadekan	18	C	237	C	770	0,14	2,22	$3,47 \cdot 10^{-3}$	N/D
	[64]	n-Oktadekan	28	C	243,5	C	865 (kruto) 770 (tekuće)	0,36 (kruto) 0,15 (tekuće)	1,9 (kruto) 2,2 (tekuće)	$8,0 \cdot 10^{-3}$	$9,1 \cdot 10^{-4}$
	[65]	Mistična kiselina	48,2	C	187,2	C	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D

		Stearinska kiselina	49,8	C	183,1	C	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
	[66]	Laurilni alkohol	25,91	C	217,5	C	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
		Etilni alkohol	51,5	C	250	C	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
	[67]	Petrolat	35	C	N/D		900	0,11	1,17	N/D	N/D
	[68]	Parafinski vosak	56	C	229	C	868	N/D	N/D	N/D	N/D
		Pčelinji vosak	65	C	229	C	878	N/D	N/D	N/D	N/D
	[69]	Pčelinji vosak	61-64	C	141-177	C	811-907	0,24-0,41	0,48-0,51	N/D	N/D
		Sojin vosak	44-45	C	101-127	C	900	0,25-0,324	0,496	N/D	N/D
	[70]	Sojin vosak	N/D		101	C	900	0,25	0,5	N/D	N/D
	[71]	Sirovo palmino ulje	35,6	C	238,4	C	895	0,17	2,08	$3,45 \cdot 10^{-3}$	N/D
	[72]	Palmin vosak	52	C	N/D		850-900	N/D	N/D	N/D	N/D
ANORGANSKI	[73]	HS 29	29	C	190	C	1681 (kruto) 1530 (tekuće)	0,48 (kruto) 0,38 (tekuće)	1,51 (kruto) 2,62 (tekuće)	N/D	N/D
	[74]	Natrijev acetat-trihidrat (NAT)	59	C	275,43	C	1450 (kruto) 1280 (tekuće)	0,62 (kruto) 0,385 (tekuće)	2,9 (kruto) 3,1 (tekuće)	N/D	N/D
	[64]	Kalcijev klorid-heksahidrat (CaCl ₂ ·6H ₂ O)	29,8	C	191	C	1710 (kruto) 1560 (tekuće)	1,08 (kruto) 0,56 (tekuće)	1,4 (kruto) 2,1 (tekuće)	$2,87 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$
	[75]		29,6	C	212	C	1710 (kruto) 1560 (tekuće)	1,08 (kruto) 0,56 (tekuće)	1,6 (kruto) 1,9 (tekuće)	N/D	N/D
	[76]		30	C	191	C	1710	1,08	1,4	$1,84 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$

EUTEKTIČKA SMJESA	[77]	Tri komponentna smjesa: laurinska, palmitinska i stearinska kiselina u omjeru 62,2:24,6:13,2.	Početak: 30,85 Vrhunac: 33,21	M	156	M	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
	[68]	Proizvedena je smjesa prirodnog pčelinjeg voska i parafinskog voska u masenom omjeru 2:1.	N/D								
	[74]	Eutektička smjesa stearinske i palmitinske kiseline	53	C	208	C	380 (kruto)	0,21 (kruto) 2,51 (tekuće)	N/D	N/D	N/D
	[65]	Smjesa miristinske i stearinske kiseline (60:40 po masenom udjelu)	36,1	C	168,3	C	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
	[66]	Smjesa laurilnog alkohola i etilnog alkohola u omjeru 75:25.	21,75	C	199	C	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D

	[64]	Eutektička smjesa kaprilne i palmitinske kiseline.	22,5	C	173	C	870 (kruto) 790 (tekuće)	0,14 (kruto) 0,14 (tekuće)	2,0 (kruto) 2,3 (tekuće)	$1,82 \cdot 10^{-3}$	$7,8 \cdot 10^{-4}$
		Eutektička smjesa kaprilne i laurinske kiseline.	18,5	C	168	C	890 (kruto) 770 (tekuće)	0,143 (kruto) 0,139 (tekuće)	1,97 (kruto) 2,24 (tekuće)	$4,33 \cdot 10^{-3}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$
	[78]	Smjesa od 82 % mase kokosovog ulja i 18 % mase suncokretovog ulja.	0,7-31,5 Vrhunac:25,8	M	308	M	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
	[79]	Natrijev karbonat-dekahidrat i magnezijev sulfat-heptahidrat u omjeru 70:30	Početak:33,2 Vrhunac:35,6	M	230,5	M	1490	0,81	1,75	N/D	N/D

C-citirano, M-mjereno, N/D-nije dostupno

U posljednjih nekoliko godina provedeno je niz istraživanja koja su ispitivala različite dodatke u FPM-ovima s primarnim ciljem povećanja toplinske vodljivosti, kako je prikazano u tablici 2.2. Ti dodaci, uključujući nanočestice, metalne okside i grafit, koriste se kako bi se poboljšala toplinska svojstva FPM-a. Iz Tablice 2 vidi se da su u nekim studijama izostavljeni detalji o svojstvima dodataka uključenih u FPM. Budući da je svrha dodavanja ovih materijala povećanje toplinske vodljivosti, važno je poznavati toplinsku vodljivost poboljšanog FPM-a. Ipak, samo je istraživanje [80] pružilo te podatke, i to u obliku grafikona. Primjerice, toplinska vodljivost čistog

FPM-a (polietilen glikol 1500) povećala se s $0,234 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ na približno $0,38 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ uz dodatak 3,0 % mase grafenskih nanomaterijala, što odgovara povećanju od 62,4 %.

U studiji [81] istraživači su proveli simulacije kako bi odredili optimalne parametre za učinkovitost FPM-a, uključujući temperaturu taljenja, debljinu sloja i toplinsku vodljivost. Rezultati studije jasno pokazuju da je za smanjenje temperature ćelije potrebna veća toplinska vodljivost.

Tablica 2.2. Pregled dodataka u FPM-u za poboljšanje toplinske vodljivosti u pasivnom hlađenju FN panela

Ref.	FPM	Dodatak/aditiv	Svojstva aditiva		Koncentracija (wt%)	Poboljšani FPM		
			Toplinska vodljivost ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Specifični toplinski kapacitet ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)		Temperatura taljenja ($^{\circ}\text{C}$)	Toplinska vodljivost ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Latentna toplota ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)
[82]	Parafinski vosak	Aluminijske strugotine	237,0	0,9	N/D	N/D	N/D	N/D
[40]		TiO ₂	N/D	N/D	1,0	N/D	N/D	N/D
[22]		ZnO prah	N/D	N/D	1,0	N/D	N/D	N/D
[83]	Parafinski vosak (rafiniran potpuno)	Višestijenčne ugljikove nanocijevi (MWCNT)	2800,0	0,843	0,2	N/D	N/D	N/D
[46]	RT42	Nanočestice željeza	76,2	0,44	1,0	N/D	N/D	N/D
[61]	Polietilen glikol 1000	Ekspandirajući grafit	N/D	N/D	15,0	34,7	N/D	125,97
[62]	Polietilen glikol 1500	Grafenski nanomaterijali	N/D	N/D	3,0	39,2	0,38	169,86
		Nanočestice bakrova oksida	N/D	N/D	3,0	36,5	0,29	162,94

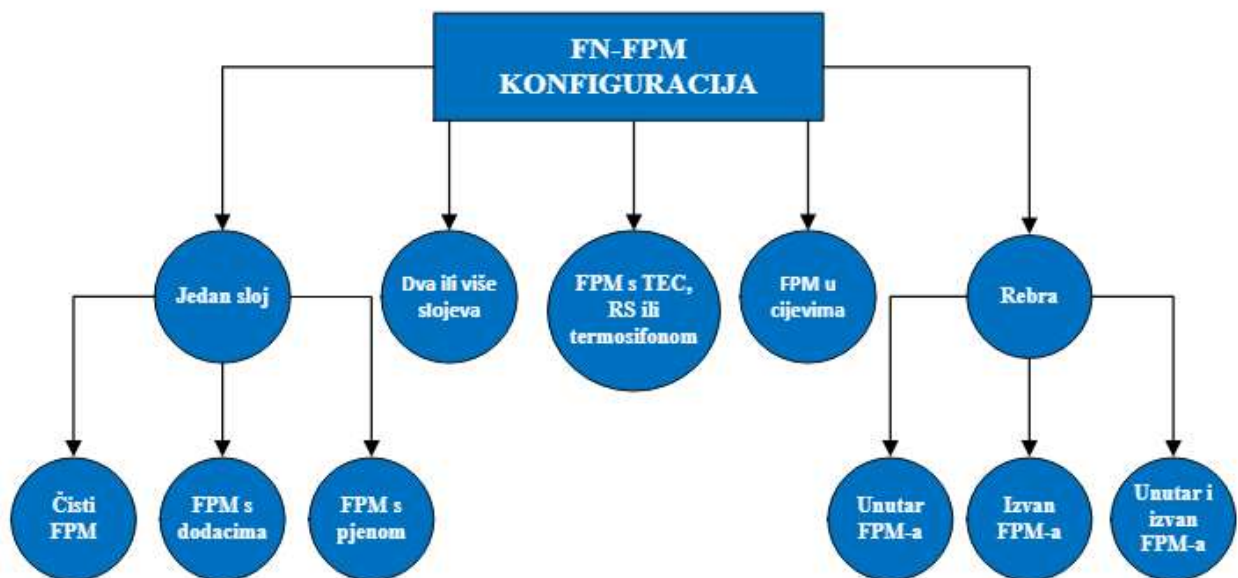
[78]	Smjesa s 82 % mase kokosovog ulja i 18 % mase suncokretovog ulja	Bemit (boehmit) u obliku nanopraha	N/D	N/D	0,9	N/D	N/D	N/D
[84]	Miješanje 40 % RT-42 i 60 % uljne šljake po masi, a zatim impregniranim u poroznu strukturu pomoću dvostupanjske vakuumske impregnacije.	Uljni pepeo	N/D	N/D	60,0	38,1°C	0,7352	71,54

Unatoč potencijalnom poboljšanju toplinske vodljivosti dodavanjem materijala poput nanočestica, još uvijek postoje značajni izazovi u pogledu dugoročne učinkovitosti i stabilnosti ovih poboljšanih FPM-ova. Termalna stabilnost sustava može biti narušena zbog sklonosti nanočestica da se tijekom vremena aglomeriraju, što dovodi do neujednačene raspodjele topline [85]. To može rezultirati smanjenjem ukupne toplinske učinkovitosti FPM-a i ograničiti njegovu primjenjivost u stvarnim uvjetima. Uz izazove povezane s toplinskom stabilnošću, postoje i zabrinutosti glede toksikološkog i okolišnog utjecaja nanočestica. Neke nanočestice, poput metalnih oksida, mogu uzrokovati oštećenja stanica putem mehanizama oksidativnog stresa, što utječe kako na ljudsko zdravlje, tako i na okoliš [86]. Njihova akumulacija u organizmu može dovesti do kroničnih zdravstvenih problema. Stoga je ključno procijeniti njihovu sigurnost u praktičnoj primjeni, osobito kada se koriste u FPM-ovima za dugotrajnu upotrebu. Još jedan značajan izazov primjene nanomaterijala

u FPM-ovima je njihov visoki trošak. Iako ti materijali mogu poboljšati toplinska svojstva, skupa proizvodnja i integracija u sustave FPM ograničava njihovu široku primjenu, osobito u velikim sustavima. Potrebna su dodatna istraživanja kako bi se ovi izazovi prevladali i optimizirala učinkovitost FPM-ova poboljšanih nanomaterijalima.

3. FN-FPM PASIVNE STRATEGIJE HLAĐENJA

Ispitane su različite konfiguracije, od kojih je svaka osmišljena da zadovolji specifične toplinske zahtjeve i poveća učinkovitost sustava. Na slici 3.1 prikazana je podjela tih konfiguracija. Posebna se pažnja pridaje razlikovanju sustava s jednim i s više slojeva, kao i onih koji uključuju dodatne elemente poput termoelektričkih hladnjaka (TEC), termosifona, cijevi i rebara radi poboljšanja učinkovitosti hlađenja.



Slika 3.1. Strukturalni prikaz strategija pasivnog hlađenja FN panela s primjenom FPM-a

3.1. Jednoslojna FN-FPM konfiguracija s čistim FPM-om

U stalnom nastojanju za poboljšanjem učinkovitosti i vijeka trajanja FN panela, pasivne tehnike hlađenja privukle su značajnu pozornost u istraživanjima. Među tim tehnikama, primjena jednog sloja FPM-a na stražnjoj strani FN panela ističe se kao osobito jednostavno i učinkovito rješenje. Glavna prednost sustava s jednim slojem FPM-a je njegova jednostavnost i ekonomičnost. Primjenom tankog sloja FPM-a na stražnju stranu FN panela, istraživači su postigli značajna poboljšanja u upravljanju toplinom, što je ključno za održavanje optimalnih performansi panela i produljenje njihovog vijeka trajanja. Tablica 3.1 sažima najvažnije studije u posljednjih

šest godina koje su koristile ovu konfiguraciju. Tablica također uključuje informacije o lokaciji, kutu nagiba, vrsti istraživačke metode i trajanju studija.

U studiji [37] korištena su dva FN panela, od kojih je jedan služio kao referentni (bez hlađenja), dok je drugi bio integriran s FPM-om (FN-FPM). Oba panela bila su postavljena pod kutom od 30° u horizontalnoj ravnini s azimutom 0° . Solarno zračenje doseglo je vrhunac u 12:30 sati s vrijednošću od 974 W/m^2 , dok je najviša izmjerena temperatura zraka bila $35,7^\circ\text{C}$ u 12:50 sati. Podaci o brzini vjetra nisu pruženi, što predstavlja značajno ograničenje jer je brzina vjetra ključna za točno procjenjivanje konvektivnog prijenosa topline i ukupnih termičkih performansi sustava hlađenja FN panela.

U studiji [69] istraživao je utjecaj različitih FPM-a na pasivno hlađenje FN panela. Testovi su uključivali standardni FN panel bez hlađenja i panel pasivno hlađen s različitim FPM-ovima, uključujući sojin vosak, parafin i pčelinji vosak. Eksperiment je proveden u laboratoriju uz korištenje solarnog simulatora sastavljenog od 20 halogenih lampi, svaka snage 500 W, te ventilatora koji simulira prosječnu brzinu vjetra od 2,5 m/s. Testovi su provedeni pri različitim konstantnim intenzitetima solarnog simulatora, pri čemu je maksimalna vrijednost bila 1.100 W/m^2 . Nadalje, provedena je simulacija korištenjem računalne dinamike fluida (CFD) pri solarnom intenzitetu od 1.100 W/m^2 . Studija nije uključivala provođenje pokusa na otvorenom, što je ključno za razumijevanje stvarnog učinka FPM-a u uvjetima prirodnog sunčevog zračenja.

U studiji [71] provedena je simulacija FN-FPM sustava u kojoj su varirani kut nagiba, debljina FPM-a i materijal kapsulacije FPM-a, uključujući aluminij, bakar i nehrđajući čelik, zbog njihovog kritičnog utjecaja na termičku učinkovitost i stabilnost sustava.

Studija [51] razvila je sveobuhvatni matematički model za simulaciju performansi FN panela integriranih s tri različita FPM-a (RT21, RT35 i RT44) u različitim klimatskim uvjetima. Cilj je bio poboljšati regulaciju temperature i povećati učinkovitost panela, pri čemu je korišten genetski algoritam za optimizaciju varijabli poput brzine vjetra, temperature taljenja i mase FPM-a. Numerička simulacija provedena je bez analize neovisnosti mreže, što je ključno za određivanje optimalne gustoće mreže potrebne za točnost numeričkih rezultata. Takva analiza osigurava

stabilnost rezultata pri promjeni veličine mreže i omogućuje ravnotežu između računalne učinkovitosti i točnosti simulacije.

U studiji [64] provedene su numeričke simulacije sa sedam različitih FPM-a u šest debljina između 5 i 50 mm, uz razmatranje dviju lokacija u Čileu s različitim klimatskim uvjetima: Vicuña (polusuha) i Calama (aridna). Trajanje studije bilo je 72 sata, pri čemu su podaci posljednja 24 sata analizirani. Za procjenu performansi FN-FPM sustava tijekom cijele godine, korišteni su reprezentativni mjeseci za svaku sezonu: lipanj za zimu, prosinac za ljeto, te ožujak i rujan za proljeće i jesen. Ovaj pristup omogućuje hvatanje sezonskih varijacija i njihovog utjecaja na performanse sustava.

Prvi dio eksperimenta u studiji [59] bavi se pasivnim hlađenjem FN panela FPM-om. Tri polikristalna panela od po 20 W korištena su za usporedbu: jedan referentni bez hlađenja, drugi s 30 mm slojem FPM-a prekrivenim staklom, dok je treći imao dodatni sustav burlapa i bazene s vodom radi poboljšanja hlađenja kapilarnim djelovanjem i isparavanjem.

Studija [55] analizirala je performanse FPM-a tijekom važnih astronomski događaja poput zimskog i ljetnog solsticija te jesenske ravnodnevnice. Korišten je tanki aluminijski spremnik s FPM-om i provedene CFD simulacije pri konstantnoj brzini vjetra od 1,0 m/s. Produženo praćenje od 48 sati omogućilo je analizu da li FPM uspješno prolazi kroz faze taljenja i očvršćivanja unutar jednog dnevnog ciklusa, što je ključno za točno pohranjivanje energije.

Tradicionalno, regulacija temperature FN panela provodi se pomoću jednog čvrstog spremnika ispunjenog FPM-om pričvršćenog na stražnju stranu panela. U studiji [44] istražen je inovativni pristup s više manjih spremnika FPM-a umjesto jednog velikog. Ukupna masa FPM-a smanjena je s 1,38 kg na 0,73 kg, što predstavlja smanjenje od približno 47%, dok je potrošnja aluminijske legure smanjena s 0,586 kg na 0,373 kg, odnosno 36% manje u odnosu na klasičnu konfiguraciju. Autori nisu specificirali koju aluminijsku leguru su koristili. Nadalje, studija bi bila potpunija da su provedeni testovi s različitim brojem i oblicima spremnika, što bi pružilo bolji uvid u utjecaj tih parametara na performanse FPM sustava.

Za poboljšanje prijenosa topline s FN panela na FPM, studija [76] predložila je sustav s 11 aluminijskih spremnika ispunjenih FPM-om pričvršćenih na stražnju stranu monokristalnog

panela. Korištena je aluminijska legura 1050A, a po prvi put je karakterizirana i toplinska pasta koja se nanosi između FN panela i aluminijskih spremnika. Ova pasta je ključna za minimiziranje toplinskog otpora i osiguravanje učinkovitog prijenosa topline s FN panela na FPM, čime se poboljšava ukupno upravljanje topline i performanse sustava.

Tablica 3.1. Pregled jednoslojnih FN-FPM konfiguracija (čisti FPM)

FN-FPM konfiguracija	Ref.	Lokacija	Metodologija istraživanja	Kut nagiba (°)	Trajanje	Kratak opis sustava hlađenja
Jednoslojni (čisti FPM)	[37]	Babilon, Irak	Vanjski eksperiment	30	Sedam dana u ožujku	Na stražnju stranu polikristalnog panela pričvršćen je FPM debljine 4 cm, s maksimalnim izlaznim učinkom od 50 W.
	[74]	Izmir, Turska	Laboratorijski	N/D	60 minuta	Različiti FPM (SAT, palmitinska kiselina i eutektička smjesa stearinske i palmitinske kiseline) testirani su na monokristalnim i polikristalnim panelima. Po 100 grama svakog FPM-a bilo je zatvoreno u plastičnu vrećicu s patentnim zatvaračem, a zatim smješteno u spremnik koji je pričvršćen na stražnju stranu FN panela.
	[68]	Hawija, Irak	Vanjski eksperiment	30	Vrući ljetni dan u srpnju	Predloženi sustav koristi sloj FPM-a debljine 30 mm na stražnjoj strani polikristalnog FN panela za pasivno hlađenje.
	[69]	Surakarta, Indonezija	Laboratorijski i numerika	0	40 minuta	Spremnik izrađen od aluminijske, ispunjen FPM-om, postavljen je neposredno iza FN panela, bez zračnog razmaka između.
	[70]					
	[71]	Malezija	Numerika	različiti	5000 sekundi	Istraživani su različiti kutovi nagiba, debljine FPM-a te materijali za kapsulaciju FPM-a debljine 4 cm.

	[52]	N/D	Numerika	30	Jedan dan od 7 ujutro do 6 navečer	Optimizacija varijabli sustava obuhvaća aspekte kao što su spremnik za FPM (oblik, visina/dubina i duljina), izolacija te vrsta FPM materijala.
	[44]	Split, Hrvatska	Vanjski eksperiment	26	Od travnja do srpnja (deset uzastopnih dana svakog mjeseca)	FN panel s osam manjih spremnika ispunjenih FPM-om.
	[75]	Teheran, Iran	Vanjski eksperiment i numerika	30	44 dana u studenom i prosincu	Monokristalni FN panel s FPM-om na stražnjoj strani bio je postavljen između dviju prozirnih ploča od pleksiglasa i čvrsto pričvršćen vijcima.
	[66]	Indija	Vanjski eksperiment	14	Dva uzastopna dana	Za hlađenje FN panela razvijena je nova organska eutektička smjesa, pri čemu su FPM slojevi debljine 3 ili 5 cm primijenjeni na stražnju stranu panela.

3.2. Jednoslojna FN-FPM konfiguracija s dodacima

Nastavljajući dosadašnji napredak u pasivnom hlađenju FN panela, nedavna istraživanja usmjerena su na poboljšanje jednog sloja FPM-a dodavanjem različitih dodataka. Ovaj pristup ima za cilj unaprijediti toplinska svojstva i učinkovitost FPM sloja. Integracijom dodataka poput nanočestica, metalnih prahova ili drugih materijala u FPM, istraživači nastoje poboljšati prijenos topline, povećati kapacitet pohrane topline i optimizirati ukupni učinak hlađenja. U posljednjih šest godina samo su dvije studije implementirale ovu konfiguraciju, a njihove rezultate sažeto prikazuje tablica 3.2.

Cilj studije [87] bio je povećati učinkovitost i smanjiti temperaturu FN ćelije optimizacijom temperature taljenja, debljine sloja i toplinske vodljivosti FPM-a. Međutim, studija ne sadrži ključne detalje o konfiguraciji mreže korištenoj u numeričkim simulacijama, poput broja čvorova i specifikacija elemenata. Također, izostanak analize neovisnosti mreže predstavlja zabrinutost,

budući da je potrebno osigurati da numerički rezultati nisu neprikladno pogodoeni rezolucijom mreže.

Studija [62] ispitivala je performanse četiri FN panela snage 2 W tijekom testnog razdoblja od 7 dana. FN paneli su bili opremljeni poboljšanim FPM-om koji je sadržavao različite težinske udjele grafenskih nanočestica (GNP) i nanočestica oksida bakra (CuO), i to 1 %, 2 % i 3 %. Utvrđeno je da povećanje udjela GNP i CuO s 1 % na 3 % dovodi do značajnog smanjenja površinske temperature FN panela. Osim toga, istraživane su i učinke jednostavne mješavine te sintetskog hibrida ovih nanočestica pri 3 % mase na toplinsku učinkovitost. Iako studija pruža podatke o prosječnoj sunčevoj radijaciji i temperaturama zraka tijekom ispitnog razdoblja, teško je tvrditi da su dani ispitivanja dovoljno usporedivi za izravnu usporedbu rezultata zbog varijacija u dnevnim uvjetima. Nadalje, istraživanje je provedeno na malim FN panelima, dok bi rezultati na većim panelima mogli biti značajno drugačiji.

Tablica 3.2. Pregled jednoslojnih FN-FPM konfiguracija s aditivima

FN-FPM konfiguracija	Ref.	Lokacija	Metodologija istraživanja	Kut nagiba (°)	Trajanje	Kratak opis sustava hlađenja
Jedan sloj FPM-a s dodacima	[62]	Jahrom, Iran	Vanjski eksperiment	30	7 dana u kolovozu	Sloj debljine 30 mm nano-poboljšanog FPM-a bio je pričvršćen na stražnju površinu FN panela.
	[87]	Kuwait City, Kuvajt	Numerika	0	4 dana	Aluminijska kutija s FPM-om bila je pričvršćena na stražnju stranu FN panela.

3.3. Jednoslojna FN-FPM konfiguracija s pjenom

Integracija jednog sloja FPM-a s pjenastim strukturama pokazala se osobito učinkovitom u pasivnim FN-FPM sustavima hlađenja. Ova konfiguracija poboljšava sposobnosti toplinskog upravljanja FN panela zahvaljujući visokoj poroznosti i toplinskoj vodljivosti pjene, što u kombinaciji s FPM-om optimizira apsorpciju i odvođenje topline. Ugradnjom FPM-a u pjenastu matricu, istraživači su uspjeli poboljšati ukupnu učinkovitost prijenosa topline, pritom zadržavajući strukturni integritet i prilagodljivost sustava hlađenja. Studije pregledane u ovom odjeljku, prikazane u tablici 3.3, bave se različitim vrstama pjena, uključujući aluminijske i

bakrene pjene, te njihovim utjecajem na toplinska svojstva FPM-a kada se primjenjuju kao jedan sloj na stražnjoj strani FN panela. Studije provedene u posljednjih šest godina pružaju važne uvide u učinkovitost takvih konfiguracija u poboljšanju toplinskog upravljanja FN panela.

U studiji [47] procijenjena su tri različita sustava FN panela snage 20 W: samo FN, FN-FPM i FN-FPM s aluminijskom metalnom pjenom (AMF). Poboljšana toplinska vodljivost, koja se povećala s $0,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ za FPM bez pjene na $0,56 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ za kompozit FPM/AMF, značajno povećava sposobnost apsorpcije toplinske energije. Tijekom jednogodišnjeg eksperimenta, prosječna mjesečna sunčeva radijacija kretala se od 258 W/m^2 do 812 W/m^2 . Nažalost, podaci o brzini vjetra nisu bili dostupni, a brzina vjetra može značajno utjecati na učinkovitost hlađenja FN panela povećanjem konvektivnog prijenosa topline. Bez tih podataka teško je u potpunosti razumjeti utjecaj okolišnih uvjeta na performanse FN sustava.

U studiji [49] korišten je identičan modelni sustav, a mjerenja su provedena tijekom zimskih mjeseci: prosinac, siječanj i veljača. Korištena je aluminijska pjena s konstantnom poroznošću od 94 %.

Numerička simulacija provedena je na modelu FN panela opremljenom FPM spremnikom instaliranim na stražnjoj strani, kako je opisano u [63]. FPM spremnik bio je ispunjen aluminijskom pjenom i n-heksadekanom. Nadalje, u studiji je istražen utjecaj poroznosti od 0,92 i 0,96 na pasivno hlađenje FN panela s integriranim FPM-om. Također, analiziran je utjecaj različitih kutova nagiba (30° , 45° i 60°) na maksimalnu temperaturu, udio otopljenog FPM-a i veličinu kontura brzine. Važno je napomenuti da studija nije uključivala numeričku simulaciju FN panela bez hlađenja za usporednu analizu. Ova izostavljena referenca predstavlja značajno ograničenje, jer sprječava potpuno razumijevanje učinkovitosti FPM sustava hlađenja.

Studija [43] prikazuje tri metode pasivnog hlađenja: FPM, FPM/CFM (kombinacija FPM-a i bakrene pjene) te FPM/CFM s integriranim višeslojnim ugljičnim nanotubama (MWCNT). Analiza istražuje učinke povećanja koncentracije MWCNT dodataka na kompozitni materijal koji sadrži FPM i bakrenu pjenu. Povećanje dodatka MWCNT-a poboljšava toplinsku vodljivost kompozita FPM/CFM, što znači da učinkovitost prijenosa topline kroz materijal raste kako nanotube bolje provode toplinu. S druge strane, opaža se smanjenje specifične topline kompozita

FPM/CFM s porastom koncentracije MWCNT-a. Smanjenje specifične topline znači da materijal zahtijeva manje energije za promjenu temperature. Autori su prikazali podatke o toplinskoj vodljivosti bakrene pjene i njenoj poroznosti (0,98), no bilo bi korisno dodatno istražiti utjecaj poroznosti. Razumijevanje kako poroznost utječe na toplinska svojstva kompozita može pružiti dublji uvid u ukupnu učinkovitost prijenosa topline i performanse materijala.

Tablica 3.3. Pregled FN-FPM (jednoslojnih) konfiguracija s pjenom

FN-FPM konfiguracija	Ref.	Lokacija	Metodologija istraživanja	Kut nagiba (°)	Trajanje	Kratak opis sustava hlađenja
Jednoslojni s pjenom	[47]	Benha, Egipat	Vanjski eksperiment	31	Jedna godina	Pravokutna aluminijska pjena s poroznošću od 94%, odgovarajuća veličini spremnika FPM-a, pričvršćena je na stražnju stranu FN panela.
	[49]			30.5	Jedan dan u prosincu, siječnju i veljači.	
	[63]	N/D	Numerika	different	9 sati (od 8 ujutro do 5 popodne)	Spremnik s aluminijskom pjenom i FPM-om (n-heksadekan) integriran je na stražnju stranu FN panela.
	[88]	Dezful, Iran	Laboratorijski	N/D	150 minuta	Predloženi pristup hlađenju uključuje kombinaciju FPM-a i 2 cm debelog poroznog aluminijskog medija s poroznošću od 70%, gdje je specifična vrsta FPM-a nepoznata.

3.4. Višeslojna FN-FPM konfiguracija

Prijelaz s jednog sloja na višeslojne FPM konfiguracije predstavlja značajan napredak u području pasivnog hlađenja FN panela. Početna istraživanja usmjerena su uglavnom na sustave s jednim slojem FPM-a, no postupno se istražuju višeslojne konfiguracije. Za razliku od sustava s jednim slojem, višeslojni FPM sustavi pružaju veću fleksibilnost u toplinskom upravljanju integracijom materijala s različitim temperaturama taljenja i toplinskim svojstvima. Ovakav slojeviti pristup omogućava ciljano i učinkovito hlađenje, budući da se svaki sloj može optimizirati za određeni raspon temperatura i toplinsko opterećenje. Studije pregledane u ovom odjeljku,

prikazane u tablici 3.4., ističu dvije važne studije iz posljednjih šest godina koje istražuju višeslojne FPM konfiguracije, ocjenjujući učinak različitih kombinacija slojeva na pasivno toplinsko upravljanje FN panela.

U radu [60] provedene su početne simulacije kako bi se odredile optimalne temperature taljenja i debljine slojeva FPM-a. Istraživani su materijali RT28, OM37, OM42 i RT54, pri debljinama slojeva od 20 mm do 50 mm, kako bi se ocijenilo ponašanje FN-FPM sustava. Simulacije su pokazale da je OM42 s debljinom od 40 mm jedna od povoljnijih opcija. Nadalje, provedene su simulacije za određivanje najprikladnijih konfiguracija višeslojnog FPM-a, s fokusom na 40 mm debljinu slojeva OM37 i OM42. FPM spremnik od aluminijske debljine 40 mm podijeljen je u tri sloja, svaki debljine 13 mm. Eksperimenti su provedeni tijekom dva dana kako bi se simulacije eksperimentalno verificirale. Na prvom danu testiranja postavljena su tri sustava: prvi sustav služio je kao referentni FN panel, dok su u drugom i trećem sustavu instalirani FN paneli s FPM-om OM37, odnosno OM42. Drugog dana provedena je nova serija testova s tri sustava: prvi sustav ponovno je služio kao referentni panel za usporedbu, dok su drugi i treći sustavi bili višeslojne konfiguracije; drugi sustav sadržavao je dva sloja OM37 i jedan sloj OM42, dok je treći sustav imao jedan sloj OM37 i dva sloja OM42. Napomenuto je da su uvjeti okoliša bili slični na oba dana testiranja, no specifične razlike, poput sunčeve radijacije ili temperatura zraka, nisu eksplicitno navedene, zbog čega je usporedba rezultata za ova dva dana upitna.

U studiji [58] korišteni su FN paneli snage 10 W u četiri različite konfiguracije. Prva konfiguracija služila je kao referentna i sadržavala je FN panel bez FPM-a. U drugoj konfiguraciji integrirana su dva FPM-a, PT48 i PT58, s debljinama od 2 mm i 6 mm, na stražnjoj strani FN panela. U trećoj konfiguraciji korišteni su isti FPM-ovi na stražnjoj strani, svaki s debljinom od 4 mm. Konačno, u četvrtoj konfiguraciji FN panel bio je opremljen istim FPM-ovima s debljinama od 6 mm i 2 mm na stražnjoj strani. Kritični aspekt koji je u ovoj studiji izostavljen je specifikacija aluminijske legure korištene za ploču između slojeva FPM-a. Svojstva ove aluminijske ploče, poput toplinske vodljivosti, od ključne su važnosti jer izravno utječu na učinkovitost prijenosa topline i ukupne performanse FPM sustava. Eksperiment je proveden tijekom dva tjedna u srpnju, no rezultati su prikazani samo za tri dana kada nije bilo oblačno. Maksimalna sunčeva radijacija i raspon temperature zraka za svaki dan navedeni su, ali podaci o brzini vjetra nedostaju. Na primjer,

drugog dana eksperimenta postignuta je maksimalna sunčeva radijacija od 750 W/m^2 , a temperatura zraka kretala se od $28,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ do $37,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tablica 3.4. Pregled višeslojnih FN-FPM konfiguracija

FN-FPM konfiguracija	Ref.	Lokacija	Metodologija istraživanja	Kut nagiba ($^{\circ}$)	Trajanje	Kratak opis sustava hlađenja
Dva ili više slojeva	[48]	N/D	Numerika	90	240 minuta	Dizajnirane su i numerički analizirane različite višeslojne konfiguracije FN-FPM sustava koje integriraju organski FPM (RT44) i/ili metalni FPM (CERROLOW-117). U studiji je sustavno ocijenjeno nekoliko konfiguracija variranjem debljine FPM slojeva, pri čemu je organski FPM korišten kao drugi sloj u svim konfiguracijama. Ukupno je analizirano deset različitih konfiguracija, s debljinom FPM sloja u izravnom kontaktu s FN panelom u rasponu od 1 mm do 6 mm. Osim toga, između FPM slojeva umetnut je aluminijska ploča debljine 2 mm kako bi se povećala toplinska vodljivost i poboljšala učinkovitost prijenosa topline unutar sustava.
	[60]	Kanpur, India	Vanjski eksperiment i numerika	26	Dva dana u svibnju	Višeslojni sustav koji se sastoji od FPM-a s rastućim temperaturama topljenja smješten je u aluminijski spremnik podijeljen u tri dijela.
	[58]	Taxila, Pakistan	Vanjski eksperiment	34	Tri najbolja dana iz dva tjedna mjerenja u srpnju.	Hibridni FPM, odvojen aluminijskom pločom pričvršćenom na stražnju stranu FN panela.

3.5. FN-FPM konfiguracija s TEC-om, RC-om ili termosifonom

Recentne inovacije u tehnologijama pasivnog hlađenja FN panela sve više se fokusiraju na integraciju različitih mehanizama hlađenja, poput termoelektričkih hladnjaka (TEC), radiativnog hlađenja (RC) i termosifona, u kombinaciji s FPM-om. Ovakav pristup ima za cilj poboljšati ukupno toplinsko upravljanje FN panela iskorištavanjem prednosti svake od tehnologija. Studije koje uključuju kombinacije TEC-a, RC-a ili termosifona s FPM-om prikazane su u tablici 3.5.

U sustavima FN/TEC, kao još jednoj pasivnoj tehnologiji hlađenja, termoelektrični moduli koriste infracrveni dio sunčevog spektra, dok FN ćelije pretvaraju UV i vidljivu svjetlost u električnu energiju. Najveći izazov predstavlja promjenjiva sunčeva radijacija na otvorenom, što smanjuje učinkovitost termoelektričnih modula [89]. Kako bi se prevladao ovaj problem, u radu [77] predložen je model FN/FPM/TEC. Istraživanje obuhvaća tri različita modela: referentni model, FN/TEC model i FN/FPM/TEC model. U FN/FPM/TEC sustavu korišteno je osam čvrstih aluminijskih blokova, svaki s unutarnjom cijevi promjera 12 mm pričvršćenom na stražnju stranu FN panela. Dodatno, osam TEC modula spojeno je u seriju s ovim blokovima.

RC predstavlja perspektivnu tehnologiju koja se sve više koristi za pasivno hlađenje FN sustava. Na primjer, u studiji [57] provedena je računalna simulacija razmatrajući osam različitih kombinacija pasivnog hlađenja FN panela, uključujući hladnjake (HS), FPM i RC te njihove kombinacije. Radiativni sustav hlađenja instaliran je na vrhu FN panela i uključuje komponente namijenjene učinkovitoj emisiji infracrvenog zračenja. Ključni element je idealni IR emiter u kombinaciji s srebrnim filmom, što omogućava učinkovito otpuštanje topline nastale u FN panelu u okolni prostor i atmosferu. Debljina FPM sloja varirana je od 1,5 do 4,5 mm. S druge strane, autori su se oslanjali isključivo na numeričke simulacije bez eksperimentalne verifikacije, što ograničava pouzdanost rezultata jer simulacije možda ne odražavaju uvjete u stvarnom okruženju.

U radu [19] u FPM su ugrađeni dvofazni zatvoreni termosifoni radi poboljšanja učinkovitosti prijenosa topline. Konkretno, izveden je laboratorijski eksperiment s četiri polikristalna FN panela snage 5 W. Prvi panel služio je kao referentni, drugi je integriran u FPM, treći je koristio termosifone punjene metanolom uronjene u FPM, a četvrti termosifone punjene ioniziranom vodom unutar FPM-a. Zatvoreni dvofazni termosifoni izrađeni su od bakrenih cijevi

promjera 8 mm i debljine stijenke 0,70 mm. Nedostatak specificiranja bakrene legure i njenih svojstava otežava ponovljivost eksperimenta. Nadalje, eksperiment je proveden isključivo u laboratorijskom okruženju uz konstantnu solarnu insolaciju od 1.010 W/m^2 , što znači da nije provedeno vanjsko testiranje pod stvarnim uvjetima, što može ograničiti primjenjivost rezultata u praksi.

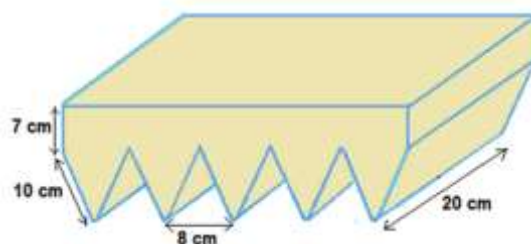
Ovaj odjeljak uključuje i studiju [78] u kojoj se FPM spremnik ne nalazi na stražnjoj strani FN panela. Umjesto toga, koristi se napredna tehnologija hlađenja koja kombinira prirodnu cirkulaciju vode i FPM mehanizme za maksimalno iskorištavanje solarne energije bez dodatne potrošnje električne energije. Konfiguracija predloženog modela prikazana je na slici 3.1a. Proces počinje postavljanjem spremnika s FPM-om u rezervoar koji se zatim puni čistom vodom. Spremnik s FPM-om ima cik-cak konfiguraciju prikazanu na slici 3.1b. Aktivacijom solarnog simulatora u laboratoriju, FN panel se postupno zagrijava, pokrećući prirodni tok vode unutar sustava zbog uzgonskih sila. Topla voda iz kanala na stražnjoj strani FN panela zatim teče prema FPM hladnjaku i prenosi toplinu na FPM. Ohlađena voda vraća se u kanale pod utjecajem gravitacije. Ovaj proces omogućava kontinuiranu cirkulaciju vode bez potrebe za pumpom, minimalizirajući potrošnju energije. Korištenje prirodne konvekcije i gravitacije osigurava učinkovito hlađenje FN panela, što može poboljšati ukupnu učinkovitost i dugovječnost FN sustava.

U studiji su model pasivnog hlađenja primijenili u dva slučaja, uspoređujući ih s referentnim slučajem bez hlađenja. U prvom slučaju korištena je kompozitna uljna smjesa od 82 wt% kokosovog ulja i 18 wt% suncokretovog ulja kao FPM. U drugom slučaju, u smjesu je dodan boehmitni nano prah radi poboljšanja toplinske vodljivosti, iako numerički podaci o povećanju toplinske vodljivosti nisu prikazani. Također, izostala je usporedba s modelom u kojem je FPM postavljen na stražnju stranu FN panela, što bi bilo ključno za dublje razumijevanje prednosti predloženog hibridnog modela pasivnog hlađenja. Takva usporedba omogućila bi precizniju procjenu potencijalnih ušteda energije kroz cijeli vijek trajanja panela i ukupno poboljšanje učinkovitosti solarnog sustava.

a)



b)



Slika 3.1. Eksperimentalna postava: realni prikaz predloženog modela (a), shematski prikaz FPM spremnika u obliku cik-cak s dimenzijama (b) [78].

Tablica 3.5. Pregled FN-FPM konfiguracija s TEC, RS ili termosifonom

FN-FPM konfiguracija	Ref.	Lokacija	Metodologija istraživanja	Kut nagiba (°)	Trajanje	Kratak opis sustava hlađenja
s TEC, RS ili termosifonom	[77]	Islamabad, Pakistan	Vanjski eksperiment	46	Od veljače do travnja (tri dana svakog mjeseca)	FPM i TEC integrirani su na stražnjoj strani FN panela.
	[57]	Atacama pustinja	Numerika	0	840 minuta	Izvedba FN panela analizirana je za osam kombinacija HS, FPM i RC.
	[19]	Samsun, Turska	Laboratorijski	26	2 sata	FN panel s vodom/metanolnim termosifonima uronjenim u FPM.
	[78]	N/D	Laboratorijski	90	350 minuta	Pasivni sustav hlađenja koji koristi prirodnu konvekciju vode u kombinaciji s hlađenjem temeljenim na FPM-u.

3.6. FN-FPM konfiguracija s FPM-om u cijevima

U ovom odjeljku fokus je na studije koje se bave uporabom cijevi za poboljšanje učinkovitosti pasivnog hlađenja FN panela. U tim istraživanjima razmatraju se različite konfiguracije cijevi s FPM-om kako bi se poboljšalo termalno upravljanje. Upotreba cijevi, često izrađenih od bakra ili aluminijskih, omogućuje učinkovitije odvođenje topline stvaranjem mreže kroz koju se toplina može bolje disipirati. Sljedeće studije, navedene u tablici 3.6, ilustriraju različite pristupe i konfiguracije za optimizaciju hlađenja FN panela.

Tijekom ljetne sezone proveden je eksperiment za predloženi sustav opisan u [50]. FPM je postavljen na stražnju stranu modela unutar spremnika zajedno s bakrenim cijevima. Ponovljivost eksperimenta je ograničena zbog nedostatka podataka o kutu nagiba, broju bakrenih cijevi i specifičnostima bakrene legure korištene za cijevi. Ipak, rezultati pokazuju da parafin (RT47) doseže temperaturno ograničenje. Pri temperaturama okoline od 47°C, FPM je apsorbirao dovoljno topline da spriječi daljnje upijanje topline od ploče, djelujući tako kao izolacijska barijera. U takvim slučajevima aktivno hlađenje postiže se uključivanjem ventilatora od 30 W montiranog na dnu FN panela. Ventilator puše zrak kroz bakrene cijevi, pomažući u snižavanju temperature FPM-a.

Studija [67] istraživala je termalnu učinkovitost monokristalnih FN panela nominalne snage 15 W kombinacijom simulacije i eksperimentalnog testiranja. Procijenjene su tri različite konfiguracije panela: standardni referentni panel, panel s integriranim FPM-om i panel s FPM-om obogaćenim nanočesticama magnezijevog oksida (MgO). FPM materijali su strateški postavljeni u 8 aluminijskih cijevi na stražnjoj strani FN panela, čime je povećana površina za prijenos topline za 49,2 %. Eksperimentalna faza trajala je tjedan dana u travnju, fokusirajući se posebno na sunčane dane kako bi se osigurali optimalni uvjeti za prikupljanje podataka. Uz to, provedene su numeričke analize kako bi se ispitali učinci različitih brzina zraka i kutova nagiba panela na površinske temperature. Usporedba eksperimentalnih podataka i rezultata simulacije pokazala je male odstupanja, što potvrđuje pouzdanost simulacijskog modela. Ova odstupanja kretala su se od maksimalno 4,9 % do minimalno 0,28 %, što potvrđuje konzistentnost i točnost računalnih predviđanja u odnosu na stvarna opažanja.

Vrijedi napomenuti da je jedna od rijetkih studija [40] pružila detaljne tablične i grafičke prikaze sunčevog zračenja, temperature okoline i brzine vjetra tijekom eksperimenta. Ipak, eksperiment je bio ograničen na samo jedan dan, od 9 do 16 sati, što predstavlja ograničenje s obzirom na varijabilnost vremenskih uvjeta. Studija je uspoređivala izvedbu standardnog FN panela, FN panela s FPM-om i FN panela s FPM-om s dodatkom TiO₂. Paneli s FPM-om bili su smješteni u višecijevni bakreni okvir. Međutim, studija ne navodi informacije o korištenoj bakrenoj leguri i njezinoj cijeni, što je ključno za sveobuhvatnu ekonomsku analizu. U sličnom eksperimentu provedenom od istih autora u [22], TiO₂ dodatak je zamijenjen ZnO-om. I ovaj je eksperiment bio ograničen na jedan dan. Bilo bi korisno uključiti usporedbe između konfiguracija FN/FPM/ZnO i FN/FPM/TiO₂ kako bi se procijenili učinci različitih dodatnih materijala na rezultate.

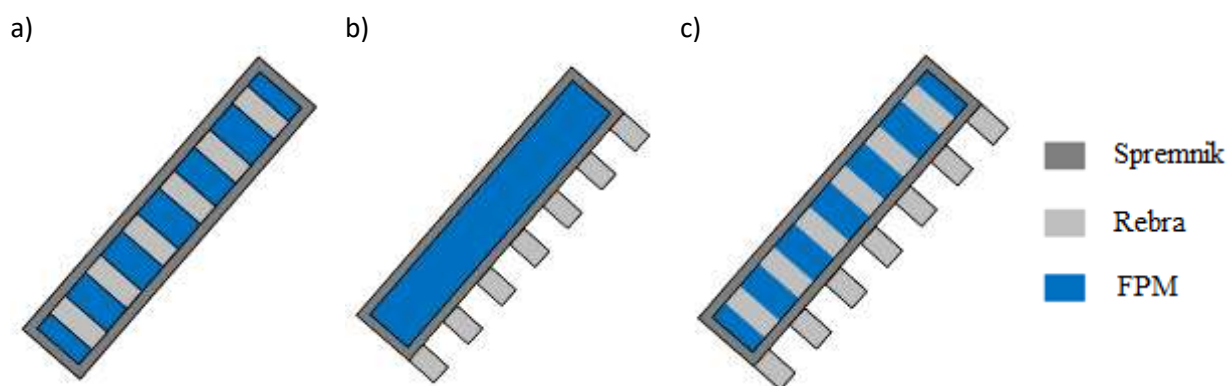
Tablica 3.6. Pregled FN-FPM konfiguracija s FPM u cijevima

FN-FPM konfiguracija	Ref.	Lokacija	Metodologija istraživanja	Kut nagiba (°)	Trajanje	Kratak opis sustava hlađenja
FPM u cijevima	[50]	Taxila, Pakistan	Vanjski eksperiment	N/D	Tijekom ljeta	Dvije trećine kućišta FPM-a ispunjene su parafinskom voskom, a bakrene cijevi integrirane su u stražnje kućište panela.
	[67]	Islamabad, Pakistan	Vanjski eksperiment i numerika	33	Jedan vikend u travnju	FPM je smješten u 8 pravokutnih cijevi s razmakom od 25,4 mm između njih na stražnjoj strani FN panela.
	[22]	Jeddah, Saudijska Arabija	Vanjski eksperiment	25	Jedan dan u ožuljku	Monokristalni FN paneli, opremljeni FPM-om ili FPM-om dopiranim s ZnO na stražnjoj strani, smješteni su u okvir s više bakrenih cijevi.

3.7. FN-FPM konfiguracija s rebrima

U nedavnim istraživanjima pasivnog hlađenja FN panela, rebra su široko proučavana kao način poboljšanja učinkovitosti prijenosa topline, čime se optimizira termalno upravljanje i potencijalno povećava ukupna energetska učinkovitost. U ovom odjeljku predstavljene su studije

iz posljednjih šest godina koje su ispitivale različite konfiguracije rebara, uključujući unutarnja, vanjska i kombinirana rješenja, kako je prikazano na slici 3.2. Tablica 3.7 sažima relevantnu literaturu iz istog razdoblja, fokusirajući se na primjenu rebara integriranih s FPM-om za hlađenje FN panela. U tablici 3.7 studije su kategorizirane prema unutarnjim, vanjskim i kombiniranim konfiguracijama rebara.



Slika 3.2. Izvedbe FN-FPM konfiguracija s rebrima: unutarnjim (a), vanjskim (b), unutarnjim i vanjskim (c).

3.7.1. FN-FPM konfiguracija s unutarnjim rebrima

Unutarnja rebra smještena su unutar spremnika FPM-a na stražnjoj strani FN panela. Ova konfiguracija pomaže održati stabilniju temperaturu unutar panela, što može povećati dugovječnost i učinkovitost FN panela. Prednosti unutarnjih rebara uključuju bolju kontrolu temperature i zaštitu materijala od vanjskih utjecaja koji bi mogli uzrokovati koroziju ili kontaminaciju. S druge strane, unutarnja rebra mogu povećati troškove dizajna i proizvodnje panela.

U studiji [46] eksperiment je proveden tijekom dva dana u lipnju u klimatskim uvjetima u Muğli, Turska. Prvog dana izmjerene su vrijednosti na referentnom FN panelu i na dvije različite konfiguracije spremnika za pohranu latentne topline (LHSU): jedan s čistim parafinom i drugi s parafinom i 3 uzdužna rebra. Sljedećeg dana izmjerene su konfiguracije LHSU s parafinom i 3 odnosno 6 rebara te LHSU s nano-pojačanim parafinom s česticama željeza i 6 rebara. Odstupanja od 1,07 % za prosječnu temperaturu okoliša i 1,19 % za solarnu radijaciju omogućuju pouzdano uspoređivanje podataka za ta dva dana. Međutim, studija ne specificira sastav legure aluminija

korištenog za rebra i spremnik, niti kut nagiba panela tijekom eksperimenta, što ograničava potpunu razumljivost i ponovljivost eksperimentalnog postava.

U nedavnoj studiji [45] istraživana je sustav s ravnim aluminijskim rebrima u spremniku FPM-a, dok je drugi sustav predložio perforirana aluminijska rebra. Oba sustava testirana su u laboratoriju pri konstantnoj solarnoj radijaciji od 600 W/m^2 . Nedostatak studije je što nije provedeno vanjsko eksperimentalno ispitivanje, što otežava procjenu performansi sustava u promjenjivim vanjskim uvjetima, poput intenziteta sunčevog zračenja, temperature i vremenskih uvjeta. Također, korištena aluminijska legura za spremnik i rebra nije poznata, a ta informacija je ključna jer različite legure imaju različite toplinske vodljivosti i otpornost na koroziju, što značajno utječe na performanse i dugovječnost sustava. Kut nagiba postavljen je na 0° , što nije optimalno za maksimalno iskorištavanje sunčevog zračenja, jer optimalni kut ovisi o geografskom položaju i dobu godine.

U studiji [61] kompozitni FPM smješten je u spremnik od akrilnog stakla kako bi se vizualizirao proces topljenja FPM-a uz 10 unutarnjih rebara. Predloženi sustav hlađenja eksperimentalno je uspoređen s konvencionalnim FN panelom tijekom samo jednog dana, što predstavlja ograničenje istraživanja.

U eksperimentalnoj studiji [56] istražen je utjecaj broja rebara na brzinu prijenosa topline i ukupnu termalnu učinkovitost FPM-a RT35-HC u sustavu pasivnog hlađenja FN panela. Testirane su konfiguracije s 2, 5, 8 i 11 rebara umetnutih u FPM. Rezultati su pokazali da konfiguracija s 11 rebara postiže najveću učinkovitost hlađenja panela, što se pripisuje povećanom broju rebara koje održavaju nižu i ujednačeniju temperaturu, čime se povećava električni izlaz.

Studija je dodatno istražila kombinaciju sekundarnog FPM-a s višom temperaturom taljenja (RT44-HC) u dvostrukim slojevima s pet rebara u FPM-u. Međutim, točan broj rebara i debljina slojeva nisu jasno definirani; iz prikaza na slikama može se zaključiti da debljina jednog sloja odgovara dvostrukom sloju iste debljine. Rezultati su pokazali da upotreba FPM-a s višom temperaturom taljenja donosi samo skromno poboljšanje električne učinkovitosti u usporedbi s FPM-om niže temperature taljenja. Kombinacija dvaju različitih FPM-a dala je lošije rezultate od korištenja jednog FPM-a s nižom temperaturom taljenja.

Studija nije uključila ekonomsku analizu, koja je ključna za razumijevanje financijskog utjecaja povećanja broja rebara. Provedba takve analize uključivala bi procjenu utjecaja na troškove proizvodnje i složenost dizajna, uz učinkovitost sustava. Ove informacije bile bi vrijedne za procjenu ekonomske održivosti prilagodbe rebara i podršku informiranom odlučivanju u budućim istraživanjima i projektima.

3.7.2. FN-FPM konfiguracija s vanjskim rebrima

Vanjska rebra pričvršćena su na vanjsku stranu FN panela i obično su povezane s kućištem ili okvirom panela. Ova konfiguracija omogućava da se toplina prenosi izravno u okolni prostor. Posljedično, vanjska rebra mogu značajno poboljšati učinkovitost hlađenja, osobito kada vanjski vjetar doprinosi hlađenju površine panela. Jedna od glavnih prednosti ove konfiguracije je povećanje površine za prijenos topline, što omogućava učinkovitiji odvod topline. Ovo je osobito korisno u toplim klimama, gdje toplinski stres može smanjiti performanse FN panela. Međutim, učinkovitost vanjskih rebara može biti pogođena vanjskim vremenskim uvjetima, poput brzine vjetra i temperature okoliša. Također, uporaba vanjskih rebara može predstavljati estetske i strukturne izazove, uključujući veće troškove instalacije i održavanja.

U studiji [73] korištena su dva identična polikristalna FN panela, svaki snage 5 W. Jedan panel služio je kao referentni i radio je bez dodatnog sustava hlađenja, dok je drugi bio opremljen FPM-om i aluminijskim rebrima te smješten u spremnik s vodom do razine rebara. Ova konfiguracija omogućila je učinkovit prijenos topline između FPM-a, aluminijskih rebara i vode. Aluminijska rebra povećavala su površinu i time stopu prijenosa topline, što je uobičajeno u sustavima termalne regulacije za učinkovitu kontrolu radne temperature. Eksperiment je proveden tijekom dva uzastopna dana u listopadu, pri čemu su solarna zračenja mjerena svakih 30 minuta. Maksimalna solarna radijacija dosegla je 743 W/m² prvog dana i 759 W/m² drugog dana. Nedostatak podataka o temperaturi okoliša ograničava potpunu analizu utjecaja vanjskih uvjeta.

U studiji [39] ispitan je utjecaj površine rebara na pasivno hlađenje FN panela. Predložena su dva sustava: jedan s ravnim rebrima i drugi s rebrima s teksturiranom površinom. Oba sustava opremljena su po 8 aluminijskih rebara i uspoređena s standardnim FN panelom bez hlađenja radi procjene učinkovitosti.

Studija [65] provedena je u laboratoriju na dva polikristalna FN panela snage 20 W. Jedan je bio standardni, neohlađeni panel, dok je drugi imao eutektic FPM (mješavina miristinske i stearinske kiseline u omjerima 60:40, 70:30 i 80:20 wt.%) smješten u aluminijskom spremniku s rebrima na stražnjoj strani. Tijekom testa intenzitet svjetlosti održavan je između 900–1.000 W/m². Nedostaju podaci o leguri aluminijske, kutu nagiba panela i vanjskim eksperimentalnim testovima, što je ključno za procjenu stvarne učinkovitosti i pouzdanosti FN-FPM sustava. Vanjski eksperimenti omogućuju promatranje reakcije sustava na promjenjive uvjete okoliša, poput sunčevog zračenja, temperaturnih fluktuacija i vremenskih uvjeta tijekom duljeg razdoblja.

Istraživanje [36] rješava problem korištenja jednog FPM spremnika iza FN panela korištenjem dvanaest nezavisnih spremnika za FPM. Ovaj pristup sprječava curenje rastopljenog parafina i održava integritet FPM-a, posebno zbog nagiba panela. Dodatno, integracija aluminijskih rebara predložena je za poboljšanje prijenosa topline i povećanje ukupne termodinamičke učinkovitosti sustava. Međutim, dimenzije spremnika, rebara i njihova raspodjela na stražnjoj strani panela nisu detaljno navedene. Istraživanje je značajno jer pruža podatke o temperaturi okoliša, solarnom zračenju, brzini vjetra i vlazi, pri čemu je vlaga posebno važna jer značajno utječe na učinkovitost pasivnog hlađenja. Veća vlažnost može usporiti prijenos topline kroz isparavanje, dok niža vlažnost može ubrzati učvršćivanje FPM-a. Razumijevanje i uzimanje u obzir vlažnosti ključno je za optimizaciju performansi FPM-a u pasivnom hlađenju FN panela.

3.7.3. FN-FPM konfiguracija s unutarnjim i vanjskim rebrima

Kombinirana rebra koriste i vanjska i unutarnja rebra kako bi se iskoristile prednosti oba pristupa i optimiziralo hlađenje. Ova konfiguracija može poboljšati ukupnu učinkovitost hlađenja, ali zahtijeva složeniji dizajn i može povećati troškove proizvodnje.

U studiji [41] tri monokristalna FN panela snage 170 W podvrgnuta su eksperimentalnim testovima kako bi se analizirale njihove termalne karakteristike. Jedan panel služio je kao referentni i nije bio hlađen tijekom testa. Drugi i treći panel modificirani su radi poboljšanja termalne učinkovitosti. U drugom panelu, aluminijska ploča pričvršćena je izravno na panel, a dodano je 9 pričvršćenih aluminijskih rebara kako bi se povećala površina za disipaciju topline.

Treći panel imao je spremnik s FPM-om montiran izravno na panelu, s 9 FPM rebara unutar spremnika te dodatnih 9 pričvršćenih aluminijskih rebara izvana kako bi se dodatno povećala površina za odvođenje topline. Eksperiment je proveden tijekom tri dana u srpnju, od 9:00 do 12:00 sati, pri čemu je najveća zabilježena solarna radijacija bila 1.400 W/m² trećeg dana. Važno je napomenuti da su sva mjerenja, uključujući solarno zračenje, provedena s vremenskim intervalom od jednog sata, što može utjecati na točnost rezultata. Korištenje finije vremenske rezolucije mjerenja poboljšalo bi razumijevanje dinamike temperature i ostalih parametara tijekom eksperimenta.

U istraživanju [72] razvijena su i testirana tri različita spremnika za FPM: žljebasti, cijevni i rebrasti. Rebrasti spremnik pokazao je najučinkovitije hlađenje. Stoga je provedena dodatna analiza pasivnog hlađenja s rebrastim spremnikom tijekom probnog razdoblja od 6 dana i uspoređena s panelom bez hlađenja. U ovom radu pruženi su samo grafički podaci, dok tablični podaci nedostaju. Stoga nije moguće točno odrediti specifične detalje, poput maksimalne solarne radijacije i vremena njenog nastupanja.

Tablica 3.7. Pregled FN-FPM konfiguracija s rebrima

FN-FPM konfiguracija	Ref.	Lokacija	Metodologija istraživanja	Kut nagiba (°)	Trajanje	Kratak opis sustava hlađenja
s unutarnjim rebrima	[46]	Mugla, Turska	Vanjski eksperiment	N/D	Dva dana u lipnju	Spremnik za pohranu latentne topline opremljen je s 3 ili 6 rebara i ispunjen standardnim parafinom ili parafinom poboljšanim nanočesticama.

	[54]	N/D	Numerika and laboratorijski	0	100 minuta, za laboratorijsko ispitivanje	Tri različita oblika rebara, s jednakom površinom presjeka – igličasta rebra, rebra u obliku slova Y i spiralna rebra – kombinirana su s FPM-om i testirana na monokristalnom fotonaponskom panelu vršne snage 10 W.
	[45]	N/D	Laboratorijski	0	60 minuta	Spremnik FPM-a opremljen je ravnim ili perforiranim aluminijskim rebrima.
	[61]	Tiruchirappalli, Indija	Vanjski eksperiment	13	Jedan dan u prosincu	Solarnom FN panelu integriran je kompozitni FPM sa spremnikom koji sadrži aluminijska rebra.
	[56]	Taxila, Pakistan	Vanjski eksperiment	34	Tri tjedna	U početku je testiran polikristalni FN panel s FPM-om na stražnjoj strani i različitim brojem rebara. U drugoj fazi eksperimenta proučavani su učinci različitih vrsta FPM-a, kao i njihove kombinacije u dvoslojnoj konfiguraciji s korištenjem pet rebara.
s vanjskim rebrima	[73]	Madurai, Indija	Vanjski eksperiment	0	Dva dana u listopadu	FPM s aluminijskim rebrima bio je smješten u spremniku napunjenom vodom do razine rebara.

	[39]	Karabuk, Turska	Vanjski eksperiment	40	Jedan sunčan dan u rujnu	FPM je pomiješan s aluminijskim strugotinama i postavljen na stražnju stranu FN panela s hladnjakom koji se sastoji od 8 ravnih ili rebrastih aluminijskih rebara.
	[65]	Khon Kean, Thailand	Laboratorijski	N/D	Jedan sat	Binarni eutektički FPM u aluminijskom spremniku s 12 rebara na stražnjoj strani FN panela.
	[36]	Ekaterinburg, Rusija	Vanjski eksperiment	45	Jedan dan u srpnju	Aluminijska rebra i FPM integrirani su na stražnjoj strani FN panela, korištenjem 12 zasebnih kapsula poput aluminijskih spremnika za pohranu FPM-a.
s unutarnjim i vanjskim rebrima	[41]	Basra, Irak	Vanjski eksperiment	30	Tri dana tijekom mjeseca srpnja.	U aluminijskom spremniku, FPM se nalazi zajedno s 18 uzdužnih aluminijskih rebara, ravnomjerno raspoređenih s unutarnje i vanjske strane.
	[72]	N/D	Vanjski eksperiment	15	6 dana	Tri različita spremnika (s utorima, s cijevima i s rebrima) postavljena su na stražnju stranu polikristalnog FN panela snage 20 W.

4. ANALIZA RAZLIČITIH FN-FPM KONFIGURACIJA U KONTEKSTU TOPLINSKE REGULACIJE I ENERGETSKE UČINKOVITOSTI

Kako bi se omogućila jasnija usporedba različitih pristupa pasivnom hlađenju FN panela pomoću FPM-a, u tablici 4.1 prikazani su sažeti rezultati relevantnih studija. Iz tablice se mogu iščitati ključni pokazatelji poput smanjenja temperature FN panela, povećanja izlazne snage i poboljšanja električne učinkovitosti. Tablica je strukturirana prema različitim konfiguracijama FN-FPM sustava, što olakšava analizu i usporedbu rezultata. Međutim, važno je naglasiti da mnogi radovi ne prikazuju sve relevantne podatke, što otežava cjelovit uvid u djelovanje FPM-a u određenim uvjetima. Unatoč tim ograničenjima, jasno je da primjena FPM-a u pravilu dovodi do značajnog smanjenja radne temperature FN panela, a time i do poboljšanja njegove učinkovitosti.

U radovima u kojima je analizirano više konfiguracija hlađenja, u tablici 4.1 prikazani su rezultati najboljih izvedbi. Takav pristup naglašava najučinkovitija rješenja unutar svakog istraživanja i osigurava da podaci prikazuju najvišu razinu poboljšanja u pogledu smanjenja temperature, povećanja izlazne snage i poboljšanja električne učinkovitosti FN panela. Na taj način, prikazani rezultati imaju veću praktičnu vrijednost za analizu optimalnih rješenja te olakšavaju usporedbu među različitim studijama. Primjerice, u istraživanju [47] uspoređivane su dvije metode hlađenja u odnosu na nehlađeni FN panel: standardni FN-FPM sustav i FN-FPM sustav ojačan aluminijskom metalnom pjenom. Tablica 4.1 donosi podatke za učinkovitiju konfiguraciju, tj. FN-FPM sustav s aluminijskom pjenom, u usporedbi s referentnim nehlađenim panelom. Prilikom prikazivanja istraživačkih rezultata važno je da autori naglašavaju prosječne, a ne samo maksimalne vrijednosti. Prosjeci daju realniju i praktičniju sliku tipičnih performansi jer obuhvaćaju širi raspon uvjeta. Na taj se način smanjuje mogućnost da rezultati budu iskrivljeni zbog specifičnih eksperimentalnih postavki ili izdvojenih ekstremnih slučajeva. Suprotno tome, maksimalne vrijednosti često proizlaze iz idealnih ili strogo kontroliranih uvjeta, koji se rijetko susreću u stvarnoj primjeni. Tako, primjerice, istraživanje može prikazati maksimalno smanjenje temperature ili povećanje učinkovitosti postignuto samo u optimalnim uvjetima, što ne odražava nužno ponašanje sustava u praksi. Usporedbom prosječnih vrijednosti iz više studija moguće je dobiti jasniji i konzistentniji uvid u utjecaj FPM-a na performanse FN panela u različitim okruženjima. Ovakav pristup omogućuje pouzdaniju procjenu učinkovitosti FPM-a jer obuhvaća širi spektar uvjeta, a ne oslanja se samo na izolirane, idealizirane scenarije.

Tablica 4.1. Utjecaj različitih FPM-ova na pokazatelje toplinskih performansi: smanjenje temperature, povećanje izlazne snage i povećanje učinkovitosti

FN-FPM konfiguracije	Ref.	Smanjenje temperature	Povećanje izlazne snage	Povećanje električne učinkovitosti	Napomena
Jednoslojna konfiguracija s čistim FPM-om	[37]	12,6°C prosječno	7,2% prosječno	6,9% relativno (rel.) prosječno	Podaci o struji, naponu i temperaturi stražnje ćelije bilježeni su svakih 10 minuta tijekom razdoblja mjerenja i navedeni u tablici kao prosječne vrijednosti.
	[74]	22,84% maksimalno (maks.)	24,97% maks.	24,95% maks.	Svi podaci prikazani su za monokristalni panel kada je kao FPM korišten NAT debljine 30 mm. Podaci o smanjenju temperature dobiveni su pri zračenju od 910 W/m ² , što odgovara kolovozu, dok su ostala dva podatka dobivena pri zračenju od 980 W/m ² , što odgovara srpnju.
	[68]	3,04°C (5,56%) prosječno	2,07% dnevno	1% apsolutno (aps.) 7,4% rel. u 10:00 sati	Podaci su prikazani za slučaj kada je pčelinji vosak korišten kao FPM, budući da postiže najbolje rezultate.
	[71]	109,4°C (maksimalni prosjek)	N/D	N/D	Podaci o temperaturi odnose se na kut nagiba od 90° i debljinu FPM-a od 20 mm. Međutim, podaci nisu jednoznačni i njihova pouzdanost je upitna, a temperaturna krivulja ne odgovara navedenim numeričkim vrijednostima.
	[51]	27°C (41%) na maks. temp.	0,2 W (10,5%) maks.	1% aps. (5,34% rel.) maks.	Podaci u tablici dani su za Arizonu i FPM RT21.
	[69]	8,5°C (13,5%) maks.	1,25 W (5,49%) maks.	N/D	Podaci navedeni u tablici odnose se na laboratorijski eksperiment proveden pri intenzitetu zračenja od 1100 W/m ² , koristeći pčelinji vosak kao FPM.
	[70]	6,0°C (9,88%) maks.	0,386 W (1,14%)	0,13% aps. 2,22% rel.	Prikazani su rezultati laboratorijskih ispitivanja pri intenzitetu zračenja od 1100 W/m ² . Najveće povećanje električne učinkovitosti, 0,42 % apsolutno, postignuto je pri intenzitetu od 900 W/m ² .

	[64]	17,5°C (33,59%) maks.	7,2% maks.	N/D	Svi podaci navedeni u tablici odnose se na slučaj kada je $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ korišten kao FPM s debljinom od 40 mm. Osim toga, podaci se odnose na jesen i polusuhi klimatski uvjet. Tijekom cijele godine, ovaj scenarij rezultira poboljšanjem proizvodnje električne energije od 5,8 %.
	[59]	8,1°C (14,4%) pri maks. sunčevom zračenju 6,5°C (11,8%) prosječno	1% pri maks. sunčevom zračenju 3,6% prosječno	2% rel. između 11:00 i 13:00h.	Podaci se odnose na FV–FPM sustave. Još bolji rezultati mogu se postići primjenom drugih pasivnih tehnika. Na primjer, smanjenje temperature tijekom maksimalnog sunčevog zračenja iznosilo je 8,7 °C (28,6 %) za BUR-SL i 15,3 °C (15,7 %) za BUR-AG. Osim toga, prosječno povećanje izlazne snage za BUR-SL iznosilo je 17,3 %.
	[55]	20°C u podne	5,6% dnevno, tijekom ljetnog solsticija	N/D	Prikazani rezultati odnose se na RT35HC drugog dana simulacije, tijekom ljetnog solsticija..
	[42]	12% prosječno	N/D	N/D	Podaci su dani za kut nagiba od 90°. Ukupno vrijeme potrebno za dovršetak procesa topljenja FPM-a pri kutu nagiba od 90° i 0° iznosi 1,8, odnosno 3,2 sata..
	[52]	N/D	9% pri maks. sunčevom zračenju	10% pri maks. sunčevom zračenju	Podaci se odnose na najbolji slučaj, trapezoidnog oblika s donjom visinom od 50 mm, gornjom visinom od 90 mm i duljinom od 1000 mm za RT25.
	[44]	0,3°C (1,09%) prosječno	366 Wh (10,7%)	N/D	Rezultati se odnose na predloženi model s 8 malih spremnika napunjenih FPM-om, montiranih na stražnju stranu FV panela. To rezultira boljim performansama u usporedbi s konvencionalnim jednim spremnikom. Na primjer, prosječno povećanje ukupnog izlaza za jedan spremnik iznosi 2,5 %.

	[75]	26,3°C (38%) maks. 12,62°C (23,5%) prosječno	1,04 W (22,32%) maks. 0,504 W (11%) prosječno	1,9% aps. 15% rel. maks.	Eksperimentalni podaci navedeni su u tablici. Smanjenje temperature i povećanje izlazne snage (uključujući oblačne i kišne dane) prikazano je za mjesec studeni, dok je povećanje električne učinkovitosti prikazano za oba mjeseca. Nasuprot tome, numerički rezultati za studeni pokazuju maksimalno smanjenje temperature od 18,3 % (30,5 %) i prosječno smanjenje od 10,05 °C (19,4 %).
	[66]	10,3°C (15,12%) između maks. temp. 5,3°C (9,2%) prosječno	0,07 W (1,82%) između najvećih snaga 0,07 W (2,8%) prosječno	0,28% aps. 2,85% rel. prosječno	Rezultati s prvog dana ispitivanja prikazani su za pasivno hlađeni FV panel s FPM-om debljine 5 cm nanesenim u jednoslojnoj konfiguraciji na stražnjoj strani.
	[76]	23,3°C (30,22%) maks.	15,9 W (12,46%) maks.	1,4% aps. 15,9% rel. u podne	Prikazani su rezultati mjerenja provedenih tijekom jednog dana u lipnju.
	[79]	1,8°C između maks. temp. 2,33°C (5,5%) prosječno	2,62 W (15,5%) u podne	1,14% aps. 12,94% rel. prosječno	Rezultati su prikazani za jedan od dana eksperimenta (14. ožujka).
Jednoslojna konfiguracija FPM-a s dodacima	[87]	15°C (20,8%) maks.	7,8% maks.	8,12% aps. maks.	Prikazani podaci odgovaraju optimiziranom postavu: temperatura topljenja iznosi 53 °C, debljina 48 mm, a toplinska vodljivost $9,8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Nije jasno kako se postiže tako visoka toplinska vodljivost dodavanjem grafita ili metalnih praškova, npr. koja je potrebna koncentracija tih čestica.
	[62]	31-37	N/D	10,65% rel. prosječno	Podaci pokazuju poboljšanje u sintezi hibridnih nanočestica GNP i CuO s istim omjerom masa i masnim udjelom od 3 % u usporedbi s postavom bez toplinskog apsorbera.

Jednoslojna konfiguracija FPM-a s pjennom	[47]	11,5°C maks. (u srpnju) 6,6°C (13,4%) prosječno (cijela godina)	2,34 W (18,6%) maks. (u srpnju) 6,4% prosječno (cijela godina)	13% rel. prosječno u srpnju.	Postava koja kombinira FPM s metalnom pjennom od aluminijske kao pasivnom metodom hlađenja postiže najbolje rezultate. Podaci za ovu postavu prikazani su u tablici.
	[49]	7,2°C (13,2%) maks.	1,2 W (10,5%) maks. 4,14% prosječno	N/D	Podaci za mjesec veljaču za postavu opremljenu FPM-om i aluminijskom metalnom pjennom.
	[90]	16.3% maks.	N/D	10.6% rel. maks.	Rezultati su prikazani za uporabu metalnih peleta u kombinaciji s FPM-om (rezidualni vosak).
	[63]	N/D	N/D	N/D	Konkretni podaci nisu navedeni, već je prikazana samo grafička reprezentacija. Nadalje, zbog nedostatka referentnih FV panela nije moguće dati specifične vrijednosti. Može se jedino konstatirati da je maksimalna temperatura pri poroznosti od 0,92 bila niža nego pri poroznosti od 0,96.
	[88]	21,4°C (30,44%)	8,11 W (23,08%)	3,1% aps. 23,07% rel.	Navedeni podaci određeni su na kraju testa pri konstantnom zračenju od 630 W/m ² .
	[43]	N/D	N/D	0,21% aps. 2,14 % rel. dnevni prosjek	Podaci se odnose na FPM/CFM s dodatcima MWCNT-a u koncentraciji od 0,2 %. Nadalje, podaci nisu izričito navedeni u članku, već su izvedeni iz dijagrama prikazanog u studiji.
Dva ili više slojeva FPM-a	[48]	59,6°C maks.	N/D	42,4% rel. maks.	Rezultati su prikazani za slučaj 10, gdje prvi sloj čini metalni FPM debljine 6 mm, a drugi sloj organski FPM debljine 40 mm. Utvrđeno je da ova konfiguracija osigurava optimalne performanse hlađenja, učinkovito balansirajući toplinsku vodljivost i pohranu latentne topline kako bi se poboljšala ukupna učinkovitost FV panela.

	[60]	5,1°C prosječno	N/D	3,7% rel. prosječno	Eksperimentalni podaci odnose se na višeslojnu strukturu s dva sloja OM37 i jednim slojem OM42, koja je pokazala najučinkovitije rezultate.
	[58]	8,1°C prosječno	7,2% prosječno	1,6% aps. 14,8% rel. prosječno	Podaci se odnose na drugi dan eksperimentalnih mjerenja za predloženu postavu koja se sastoji od dva FPM-a, PT48 i PT58, na stražnjoj strani, s debljinama od 6 mm i 2 mm, redom.
FPM s TEC-om, RS-om ili termosifonom	[77]	9,28°C maks. u danu	10,74% maks. u danu	N/D	Podaci su prikazani za jedan dan u ožujku. Povećanje izlazne snage pogrešno je izračunato na temelju dostupnih podataka (u članku je navedena vrijednost od 9,69 %).
	[57]	~12°C maks.	8 W (5,7%) maks.	1,02% aps. 8,09% rel. maks.	Podaci za FPM debljine 1,5 mm u kombinaciji s HS i RC navedeni su u tablici. Navedeno maksimalno smanjenje temperature predstavlja približnu vrijednost, budući da je izvedeno iz grafičke analize, a nije izričito navedeno u tablici niti u tekstu rada.
	[19]	5,4°C (9,84%) prosječno	N/D	0,12% aps. 6,12% rel. prosječno	Navedeni podaci odnose se na predloženi FV model, koji uključuje vođeni termosifon uronjen u FPM. Osim toga, podaci o smanjenju temperature odnose se na prednju stranu FV panela.
	[78]	25°C maks.	48,23% maks.	N/D	Smanjenje temperature odgovara čistom FPM-u, dok je povećanje izlazne snage zabilježeno za FPM s nanoprahom boehmita, pri konstantnom intenzitetu zračenja od 690 W/m ² .
FPM u cijevima	[50]	5-7°C za vrijeme najvećeg sunčevog zračenja	6 W u 10:30h	2,9% aps. 46,8% rel. u 13:30h	Točan dan za koji su podaci prikazani nije poznat.
	[67]	6,8°C (13,78%) maks.	1,21 W (16,32%) prosječno	9-20% rel.	Podaci su prikazani za predložene metode hlađenja FV panela s FPM-om pomiješanim s MgO, što istovremeno daje najbolje rezultate za provedeni vanjski eksperiment.

	[40]	2,2°C (4,37%) za maks. temperaturu panela	1,31 W (3,41%) za maks. izlaznu snagu 1,53 W (4,22%) prosječno	N/D	Podaci se odnose na predloženu postavu FV panela koja koristi pasivno hlađenje s FPM-om u kombinaciji s TiO ₂ , budući da je pokazala najbolje rezultate.
	[22]	2,8°C (5,22%) u podne	2,57 W (6,35%) u podne	0,25% aps. 1,97% rel. u podne	Svi podaci odnose se na predloženu postavu za pasivno hlađenje s FPM-om dopiranim ZnO-om u podne, kada je sunčevo zračenje iznosilo 955 W/m ² , a temperatura okoline 33,3 °C.
FPM s unutarnjim rebrima	[46]	17,93% prosječno	0,73 W 13,93% prosječno	1,19% aps. 15,51% rel. prosječno	Podaci slučaja: spremnik za pohranu latentne topline s nano-poboljšanim parafinom i 6 rebara
	[53]	15,1°C maks.	N/D	1,36% aps. maks.	Podaci su prikazani za slučaj kada je $\theta = 180^\circ$, L = 25 mm, s duljinom sekundarnog rebra od 10 mm. Naglašava se da je usporedba izvedena s FV–FPM sustavom bez rebara, a ne s nehladenim FV panelom kao referencom.
	[54]	9,5°C (13%)	N/D	N/D	Podaci se odnose na konfiguraciju s 100 pin-rebri, svaki dugačak 3 cm, u kombinaciji s FPM-om, nakon 100 minuta unutarnjeg testiranja. Treba napomenuti da ti podaci nisu dobiveni usporedbom s referentnim golim FV panelom, već s panelom koji uključuje samo FPM bez rebara. Razlog tome je što referentni goli FV panel doseže 85 °C, radnu granicu panela, za manje od 15 minuta.
	[45]	8,55°C (17,93%) prosječno 13,3°C (22,43%) na kraju eksperimenta	0,14 W (9,46%) prosječno	N/D	Prikazani podaci odnose se na predloženu postavu s perforiranim rebrima.

	[61]	11,35°C maks.	0,582 W (45%) maks.	3,667% aps. 35,74% rel. prosječno	Navedeni podaci odnose se na predloženu postavu koja integrira FPM i rebra unutar spremnika za FPM.
	[38]	16°C maks.	27,4 W u 11:00h	1,23% aps. 47,5% rel. prosječno	Tablica sadrži podatke za predloženu hladenu postavu FV panela, koja ima pet glatkih, valovitih rebara u spremniku s FPM-om. Eksperiment traje dva dana, a navedeni podaci odnose se na prvi dan.
	[35]	19,2°C (42,38%) za maks. temperaturu	265 W 10,39% u podne	1,22% aps. 9,22% rel. u podne	Ispitani FV model integriran je na krovu kuće i postiže toplinski učinak od 7 kWh, što povećava ukupnu učinkovitost s 13 % na 19 %.
	[56]	26,5°C maks. 13,5 °C prosječno	21% prosječno	2,0% aps. 19,6% rel. prosječno	Podaci prikazani u tablici odnose se na prvi dio eksperimenta, posebno na slučaj VI (RT35HC s 11 rebara). Treba napomenuti da ti podaci predstavljaju jedan odabrani dan tijekom eksperimenta. U drugom dijelu eksperimenta, međutim, slučaj B (RT35HC s 5 rebara) postiže bolje rezultate. Na primjer, temperatura se prosječno smanjuje za 9,7 °C, a izlazna snaga se prosječno povećava za 13,3 %.
FPM s vanjskim rebrima	[73]	16,7°C (27,8%) maks. u 10:30h (drugi dan)	8,57% prosječno	1,79% aps. 20,3% rel. maks. u podne (prvi dan)	Podaci su bilježeni svakih 30 minuta, pri čemu su mjereni i prednja i stražnja temperatura FV panela. U predloženoj konfiguraciji temperatura je mjerena na stražnjoj strani, na ravnoj površini rebara hladnjaka, koja je u izravnom kontaktu s FPM-om. Za mjerenja su korištene termalne kamere.
	[39]	6,42°C (16,46%) prosječno	4,81 W (17,21%) prosječno	18,2% rel. prosječno	Podaci se odnose na FV panel poboljšán FPM-om i ravnom aluminijskom pločom u usporedbi s referentnim panelom koji nije bio hlađen.
	[65]	7,06°C (11,99%) prosječno	0,454 W (4,226%) prosječno	0,317% aps. 4,41% rel. prosječno	Prikazani podaci odnose se na maseni omjer 60:40 miristinske i stearinske kiseline, koji daje najbolje rezultate od svih ispitivanih omjera. Treba naglasiti da je u ovoj studiji relativno povećanje električne učinkovitosti pogrešno izračunato. Ipak, točan rezultat je izračunat i uključen u tablicu.

	[36]	12,13°C (24,88%) prosječno	1,24 W (11,32%) prosječno	0,70% aps. 5,15% rel. prosječno	Podaci se odnose na predloženu postavu u usporedbi s nehladenim FV panelom.
FPM s unutarnjim i vanjskim rebrima	[41]	19,6 °C (27,2%) prosječno u podne	19,1 W (14,9%) prosječno	1,6% aps. 11,76% rel. prosječno	Podaci se odnose na treći predloženi FV panel. Nedostaci ove studije uključuju mjerenja temperature panela i izlazne snage na duljim vremenskim intervalima, što može dovesti do gubitka detalja i točnosti. Osim toga, prekid eksperimenta nakon podne ograničava mogućnost promatranja dugoročnih promjena ili učinaka koji se mogu pojaviti kasnije tijekom dana.
	[72]	6,1°C (10,54%) prosječno	N/D	0,49% aps. 5,3% rel. prosječno	Podaci su prikazani za spremnik s rebrima. Studija je pokazala da je zračenje od 500 W/m ² granična vrijednost ispod koje FPM ne poboljšava značajno performanse FV panela.

5. EKONOMSKI I OKOLIŠNI ASPEKT FN-FPM PASIVNIH KONFIGURACIJA HLAĐENJA

Analiza ekonomske isplativosti i utjecaja na okoliš ključna je za procjenu učinkovitosti pasivnih rješenja hlađenja FN panela s FPM-om. Takve procjene obuhvaćaju financijske i okolišne aspekte primjene FPM tehnologija te su nužne za donošenje pouzdanih odluka o njihovoj praktičnoj primjeni. U tablici 5.1 prikazani su odabrani radovi koji su se u posljednjih nekoliko godina bavili ekonomskim i/ili okolišnim analizama FN-FPM sustava.

Ekonomska analiza ključna je za procjenu isplativosti FN-FPM sustava, dok okolišna analiza daje uvid u njihov doprinos dugoročnoj održivosti. Financijski pokazatelji uključuju početna ulaganja, troškove rada i održavanja te očekivani povrat ulaganja. Posebno važan pokazatelj je nivelirani trošak električne energije (LCOE), koji se računa dijeljenjem ukupnih troškova (investicija, rada i održavanja) s ukupnom količinom proizvedene električne energije tijekom životnog vijeka sustava [46]. LCOE omogućuje usporedbu ekonomske učinkovitosti različitih tehnologija te olakšava odabir isplativih rješenja investitorima i donositeljima politika.

Do sada postoji tek nekoliko istraživanja u kojima je LCOE izračunat za pasivno hlađene FN sustave. Stoga tablica 5.1 donosi i druge financijske pokazatelje iz posljednjih šest godina, poput vremena povrata ulaganja, životnog vijeka sustava i kapitalnih troškova. Uključivanje šireg spektra podataka omogućuje cjelovitije razumijevanje ekonomike FN-FPM sustava, čak i kada LCOE nije dostupan. Bez detaljne ekonomske analize odluke o primjeni pasivno hlađenih FN panela mogu biti nepouzdanе, što može rezultirati neoptimalnim ulaganjima i smanjenim ostvarivanjem koristi. Zbog toga je temeljita ekonomska procjena nužna kako bi se osigurala dugoročna opravdanost i isplativost FN-FPM sustava u usporedbi s klasičnim FN panelima.

U okolišnim analizama FN-FPM sustava naglasak se najčešće stavlja na smanjenje emisija CO₂, jer taj pokazatelj izravno odražava doprinos ublažavanju klimatskih promjena – jednog od ključnih ciljeva globalne energetske politike i održivog razvoja. FN-FPM sustavi doprinose smanjenju emisija prije svega povećanjem učinkovitosti FN panela, čime se postiže veća proizvodnja obnovljive energije i smanjuje potreba za energijom iz fosilnih izvora. Iako se smanjenje emisija CO₂ često koristi kao glavni pokazatelj, važno je obuhvatiti i druge čimbenike. Primjerice, okolišni utjecaj proizvedene električne energije (EIE) pokazuje koliki je učinak proizvodnje električne energije na okoliš i može značajno varirati među sustavima. FN-FPM

sustavi s višim EIE vrijednostima mogu imati veći utjecaj po jedinici proizvedene energije, unatoč većoj učinkovitosti [46]. Nadalje, ukupni okolišni utjecaj (Yk) procjenjuje cjelokupni životni ciklus sustava – od proizvodnje i ugradnje, preko rada i održavanja, do konačnog zbrinjavanja – te daje potpuniju sliku ekološkog otiska sustava.

Sveobuhvatna okolišna analiza FN-FPM sustava, osim emisija CO₂, trebala bi uključiti i pokazatelje poput Yk i EIE, ali i razmatranje životnog ciklusa samih FPM materijala, njihove održivosti te mogućnosti recikliranja ili pravilnog zbrinjavanja nakon isteka uporabnog vijeka. Međutim, većina dosadašnjih istraživanja zanemaruje ovakav cjelovit pristup i uglavnom se fokusira isključivo na emisije CO₂, ostavljajući po strani druge važne aspekte okolišne održivosti.

Tablica 5.1. Popis literature s ekonomskim i/ili okološkim analizama

Ref.	Ekonomksa analiza	Okolišna analiza
[73]	Predloženi FV–FPM sustav ostvaruje dnevnu uštedu energije od 9,4 %, što rezultira godišnjom uštedom od 366,5 MWh za FV sustav snage 1 MW. Rezultati također ukazuju da se životni vijek panela može produžiti za 6 godina, na ukupno 31 godinu.	Predloženi pristupi hlađenju smanjuju emisije CO ₂ za 2130,578 tona godišnje, što je 183,266 tona (9,4 %) godišnje više u odnosu na referentni FV panel snage 1 MW.
[67]	Rezultati pokazuju da je korištenje FV panela s čistim FPM-om u aluminijskim cijevima ekonomski nepraktično, jer dovodi do viših troškova proizvodnje energije u usporedbi s nehladenim FV sustavima. Nasuprot tome, uključivanje nanočestica (MgO) poboljšava period povrata energije na 2,5 godine, u usporedbi s 2,84 godine za nehladeni FV panel. Podaci su izračunati na temelju kamatne stope od 10 % i životnog vijeka od 10 godina.	Podaci, izračunati za razdoblje od 25 godina uz kamatnu stopu od 10 %, pokazuju smanjenje emisija CO ₂ za 0,222 tone (18,93 %) za predloženi sustav s MgO nanočesticama pomiješanim s FPM-om.
[50]	Kapitalni troškovi modificiranog panela 25 % su viši u odnosu na referentni FV panel.	N/D
[46]	Vrijednost LCOE-a za standardni nehladeni panel iznosi 0,57 USD/kWh, dok za predloženi sustav (LHSU s nano-pojačanim parafinskim FPM-om i 6 rebara) raste na 0,98 USD/kWh. Posljedično, period povrata iznosi 4,6 godina za referentni sustav, odnosno 7,9 godina za predloženi FV–FPM sustav. Ove ekonomske vrijednosti izračunate su na temelju tečaja i podataka o troškovima za 2024. godinu.	Za standardni FV panel, vrijednost Yk iznosi 4,73 Pt/h, a vrijednost EIE 0,90 mPts/kWh. Nasuprot tome, vrijednost Yk za predložene LHSU sustave s 6 rebara i željeznim NAP-ovima povećava se na 17,78 Pt/h, dok vrijednost EIE doseže 2,98 mPts/kWh.
[60]	Predloženi višeslojni FV panel, koji uključuje dva sloja OM37 i jedan sloj OM42, produljuje životni vijek panela za najmanje 10 godina. Osim toga, ukupni prihod tijekom životnog	N/D

	vijeka FV–FPM sustava povećava se za 1.289 USD u usporedbi s referentnim sustavom.	
[61]	Godišnji trošak energije za FV panel, opremljen kombinacijom FPM-a i unutarnjih rebara, iznosi 29,52 rupija, s procijenjenim periodom povrata od 6,6 godina. U usporedbi, nehlađeni FV panel ima niži godišnji trošak od 11,80 rupija, no period povrata nije naveden u studiji. Ove ekonomske vrijednosti izračunate su na temelju tečaja i podataka o troškovima za 2023. godinu.	N/D
[44]	Investicijski troškovi sustava s nekoliko manjih spremnika FPM-a povećavaju se za 21,7 % u odnosu na referentni sustav. Ovo povećanje je značajno niže u usporedbi s 41 % povećanjem za konvencionalni dizajn s jednim spremnikom.	N/D
[36]	Predloženi FV panel imao je LCOE od 0,603 USD/kWh, dok je referentni FV panel imao LCOE od 0,671 USD/kWh.	N/D
[35]	Za referentni FV sustav, trošak proizvodnje električne energije iznosi 0,094 £/kWh, dok za predloženi FV–FPM sustav s rebrima iznosi 0,119 £/kWh. Ovi troškovi proizvodnje električne energije izračunati su na temelju ekonomskih podataka iz 2020. godine.	N/D
[76]	Period povrata za predloženi FV–FPM sustav iznosi približno 23 godine.	N/D
[79]	Financijske koristi FV–FPM sustava iznose približno 13,98 USD, temeljem ostvarene uštede energije. Kada se FV–FPM sustavi masovno proizvode, ekonomske koristi iznose točno onoliko koliko i dodatni troškovi povezani s ugradnjom FPM-a.	N/D

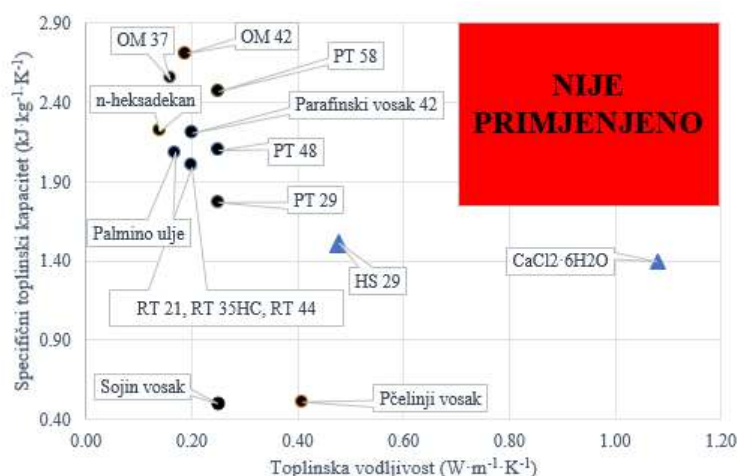
6. RASPRAVA O KLJUČNIM REZULTATIMA

U ovom se poglavlju razmatraju rezultati istraživanja s ciljem prepoznavanja ključnih nalaza i novih trendova povezanih s primjenom FPM-a u pasivnom hlađenju FN panela. Ova zapažanja nastoje pružiti dublje razumijevanje trenutnog stanja u području te usmjeriti buduća istraživanja prema optimizaciji FPM rješenja u različitim radnim uvjetima.

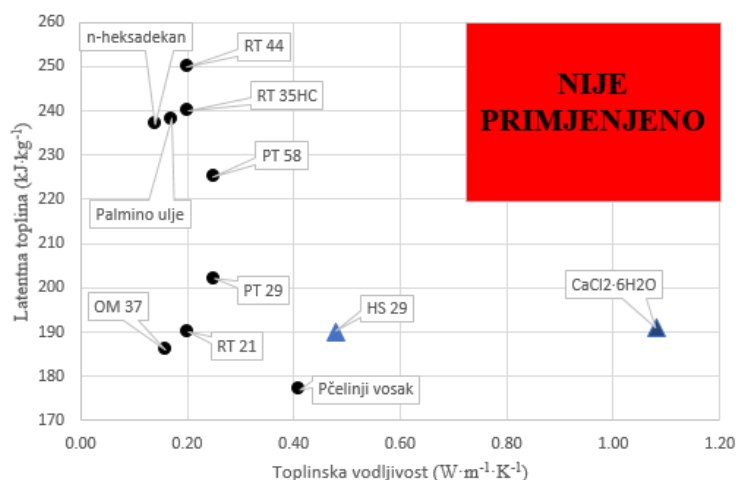
Na slici 6.1 prikazani su različiti FPM materijali koji su u posljednjih šest godina korišteni u sustavima pasivnog hlađenja FN panela, a detaljnije su opisani u tablici 2.1. Na slici 6.1a uočava se obrnuti odnos između toplinske vodljivosti i specifičnog toplinskog kapaciteta: materijali s većom toplinskom vodljivošću u pravilu imaju manji specifični toplinski kapacitet i obrnuto. Slično tome, na slici 6.1b vidljiva je obrnuta proporcionalnost između toplinske vodljivosti i latentne topline. Nadalje, većina organskih FPM-ova pokazuje relativno usko područje toplinske vodljivosti, najčešće između $0,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ i $0,25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Nasuprot tome, anorganski FPM-ovi, iako imaju veću toplinsku vodljivost, obično pokazuju manji specifični toplinski kapacitet.

Područje označeno crvenom bojom na slici 6.1 predstavlja segment u kojem FPM-ovi do sada nisu istraživani. To područje karakterizira kombinacija visoke toplinske vodljivosti, visokog specifičnog toplinskog kapaciteta i visoke latentne topline. Ovi rezultati upućuju na potrebu za dodatnim istraživanjima kako bi se razvili FPM materijali upravo u tom nedovoljno istraženom području, gdje bi takve karakteristike mogle znatno unaprijediti učinkovitost pasivnih sustava hlađenja FN panela.

a)



b)

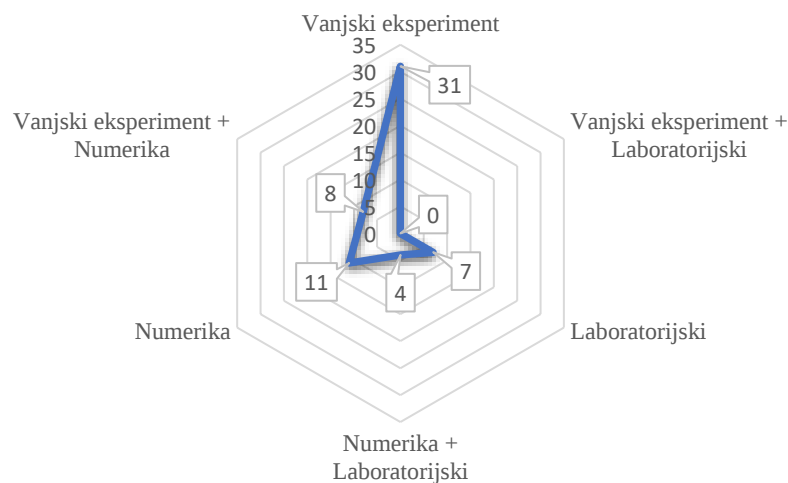


Slika 6.1. Usporedba toplinske vodljivosti u odnosu na: specifičnu toplinu (a), latentnu toplinu (b).

Na slici 6.2 prikazana je raspodjela znanstvene literature iz posljednjih šest godina koja se bavi pasivnim hlađenjem FN panela pomoću FPM-a. Raspodjela je kategorizirana prema istraživačkim metodama koje su korištene, uključujući terenske eksperimente, numeričke simulacije, laboratorijske eksperimente te različite kombinacije ovih metoda. Podaci pokazuju da je najveći broj radova (25 studija, odnosno 51%) temeljen na terenskim eksperimentima. Ovakva dominacija upućuje na izraženu sklonost empirijskim istraživanjima u stvarnim uvjetima, s ciljem potvrđivanja teorijskih modela i praktičnih primjena.

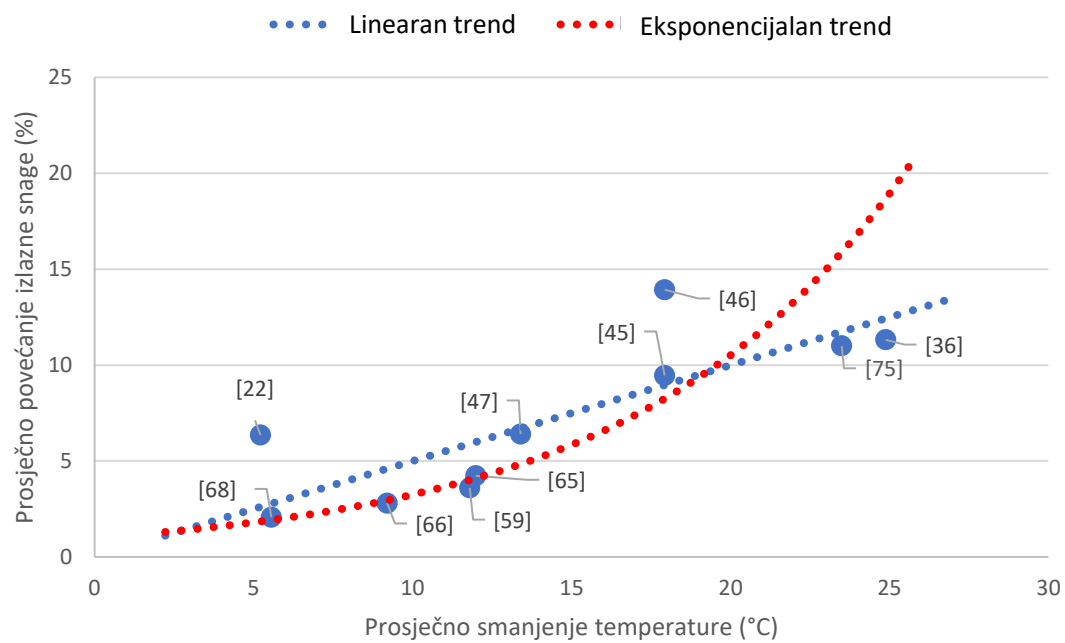
Numeričke simulacije zastupljene su kao druga najčešće korištena metoda, što pokazuje snažan oslonac na računalne pristupe za analizu i predviđanje ponašanja sustava. Laboratorijski

eksperimenti također daju važan doprinos jer omogućuju detaljna ispitivanja u kontroliranim uvjetima. Kombinacije navedenih metoda čine manji udio i odražavaju integrativne pristupe koji nastoje iskoristiti prednosti različitih istraživačkih tehnika. Važno je naglasiti da niti jedno istraživanje nije koristilo sva tri pristupa istodobno.



Slika 6.2 Raspodjela literature prema istraživačkoj metodi

Na slici 6.3 prikazani su podaci iz više istraživanja koja su se bavila pasivnim hlađenjem FN panela pomoću FPM-a, s dodatnim pasivnim komponentama ili bez njih. Rezultati sugeriraju da se veći porast izlazne snage općenito povezuje sa značajnijim smanjenjem radne temperature FN panela. Ipak, teško je jasno utvrditi trend, budući da on ovisi o mnogim međusobno isprepletenim čimbenicima. Uočena povezanost više nalikuje eksponencijalnoj nego linearnoj krivulji, što upućuje na potrebu za daljnjim istraživanjima. Važno je naglasiti da su ta istraživanja provedena u različitim okolišnim uvjetima, na različitim lokacijama te uz primjenu raznolikih FN-FPM konfiguracija. Ova varijabilnost dodatno povećava složenost i otežava donošenje općenitih zaključaka na temelju prikupljenih podataka.



Slika 6.3. Korelacija između prosječnog smanjenja temperature i prosječnog povećanja električne snage

7. ZAKLJUČCI I SMJERNICE ZA BUDUĆA ISTRAŽIVANJA

Fazno promjenjivi materijali u FN-FPM sustavima pasivnog hlađenja imaju ključnu ulogu, što potvrđuje i sve veći broj objavljenih radova na ovu temu u posljednjih šest godina. Ovaj trend jasno pokazuje da je istraživanje u tom području obećavajuće i iznimno relevantno, osobito u kontekstu globalnog prelaska na održive energetske izvore. Ovaj pregled donosi najvažnije spoznaje, ali i ukazuje na nekoliko značajnih praznina i ograničenja u postojećoj literaturi, među kojima se ističu:

- mnogi radovi nedovoljno detaljno prikazuju ključna svojstva FPM-a poput temperature taljenja, latentne topline, gustoće, toplinske vodljivosti, specifičnog toplinskog kapaciteta, viskoznosti i koeficijenta toplinskog širenja. Nedostatak potpunih podataka otežava pouzdanu usporedbu materijala i smanjuje točnost numeričkih simulacija i modeliranja,
- često se nekritički preuzimaju podaci koje navodi proizvođač, iako oni mogu biti nepouzdana. Potrebna su neovisna mjerenja kako bi se osigurala vjerodostojnost rezultata,
- u radovima u kojima se toplinska vodljivost poboljšavala dodavanjem nanočestica ili metalnih praškova, često nedostaju precizni podaci o razini postignutog poboljšanja te o svojstvima i koncentracijama aditiva,
- važni parametri poput kuta nagiba FN panela, karakteristika materijala od kojih su izrađeni spremnici ili cijevi s FPM-om, kao i troškovi i potrošnja materijala, često se izostavljaju, što otežava sveobuhvatnu ekonomsku analizu i procjenu isplativosti,
- mnoga istraživanja ne navode ključne okolišne uvjete tijekom ispitivanja (brzinu vjetra, sunčevo zračenje, temperaturu zraka, relativnu vlažnost), iako ti čimbenici značajno utječu na toplinsko ponašanje FPM-a i učinkovitost sustava,
- laboratorijski pokusi često ne uključuju ispitivanja na otvorenom, gdje varijabilni uvjeti poput sunčeva zračenja i vjetra mogu snažno utjecati na rezultate. Stoga stvarna učinkovitost FPM-a može odstupati od one dobivene u kontroliranim uvjetima,
- dio istraživanja provodi se u prekratkom vremenskom razdoblju, što ograničava mogućnost donošenja zaključaka o dugoročnoj učinkovitosti, primjerice godišnjem energetskom prinosu,

- rezultati često naglašavaju maksimalne vrijednosti smanjenja temperature ili povećanja izlazne snage, dok su prosječne vrijednosti – koje daju realniju sliku dugotrajnog učinka – rijetko uključene,
- samo manji broj radova uključuje ekonomsku analizu, iako je ona ključna za procjenu isplativosti FN-FPM sustava. Bez takvih analiza teško je opravdati primjenu FPM-a u praksi,
- procjena okolišnog utjecaja rijetko se provodi; tek su tri istraživanja obuhvatila ovaj aspekt, i to s fokusom gotovo isključivo na smanjenje emisija CO₂, zanemarujući druge važne pokazatelje održivosti. To predstavlja ozbiljan nedostatak u postojećim radovima i naglašava potrebu za sveobuhvatnijim analizama.

Unatoč navedenim ograničenjima, područje FN-FPM sustava pasivnog hlađenja nudi značajan potencijal za daljnji razvoj, i to u nekoliko ključnih smjerova:

- razvoj novih FPM-a s boljim toplinskim svojstvima, posebno s većom toplinskom vodljivošću i optimalnim temperaturama faznih prijelaza, mogao bi znatno povećati učinkovitost sustava,
- istraživanja višeslojnih FPM konfiguracija, u kojima se kombiniraju različiti materijali za učinkovitije upravljanje toplinom u širem rasponu temperatura, otvaraju prostor za napredna rješenja. Pri tome će precizne simulacije i pouzdani podaci o svojstvima biti od presudne važnosti,
- potrebno je istraživati inovativne FN-FPM konfiguracije koje integriraju FPM s drugim pasivnim tehnikama, primjerice zračnim sifonom, čime se mogu postići sinergijski učinci,
- umjetna inteligencija mogla bi se primijeniti za optimizaciju dizajna sustava, primjerice kod rasporeda rebara u FPM-u, kako bi se poboljšalo skladištenje toplinske energije. Uspostava baze podataka o temeljnim svojstvima FPM-a također bi značajno doprinijela globalnoj razmjeni znanja.

Iako su u posljednjih šest godina ostvareni značajni pomaci, i dalje postoji jasna potreba za daljnjim istraživanjem kako bi se osigurala veća učinkovitost i dugovječnost FN sustava. Nastavak istraživanja i razvoja obećava naprednije, učinkovitije i održivije FN-FPM sustave u budućnosti.

LITERATURA

- [1] W. Zhang *et al.*, “A Year Marked by Extreme Precipitation and Floods: Weather and Climate Extremes in 2024,” *Adv Atmos Sci*, vol. 42, no. 6, pp. 1045–1063, Jun. 2025, doi: 10.1007/S00376-025-4540-4.
- [2] M. Kamali Saraji and D. Streimikiene, “A novel multicriteria assessment framework for evaluating the performance of the EU in dealing with challenges of the low-carbon energy transition: an integrated Fermatean fuzzy approach,” *Sustainable Environment Research*, vol. 34, no. 1, p. 6, Apr. 2024, doi: 10.1186/s42834-024-00211-3.
- [3] S. Nižetić, M. Arıcı, and A. T. Hoang, “Smart and Sustainable Technologies in energy transition,” *J Clean Prod*, vol. 389, p. 135944, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.135944.
- [4] “CO2 Emissions – Global Energy Review 2025 – Analysis - IEA.” Accessed: Sep. 23, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025/co2-emissions>
- [5] “All Photovoltaic barometers Archives - EurObserv’ER.” Accessed: Sep. 23, 2025. [Online]. Available: <https://www.eurobserv-er.org/category/all-photovoltaic-barometers/>
- [6] “All Wind energy barometers Archives - EurObserv’ER.” Accessed: Sep. 23, 2025. [Online]. Available: <https://www.eurobserv-er.org/category/all-wind-energy-barometers/>
- [7] A. Djalab, Z. Djalab, A. El Hammoumi, G. Marco TINA, S. Motahhir, and A. A. Laouid, “A comprehensive Review of Floating Photovoltaic Systems: Tech Advances, Marine Environmental Influences on Offshore PV Systems, and Economic Feasibility Analysis,” *Solar Energy*, vol. 277, p. 112711, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.solener.2024.112711.
- [8] S. Nižetić, E. Giama, and A. M. Papadopoulos, “Comprehensive analysis and general economic-environmental evaluation of cooling techniques for photovoltaic panels, Part II: Active cooling techniques,” *Energy Convers Manag*, vol. 155, pp. 301–323, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2017.10.071.
- [9] P. Dwivedi, K. Sudhakar, A. Soni, E. Solomin, and I. Kirpichnikova, “Advanced cooling techniques of P.V. modules: A state of art,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 21, p. 100674, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.csite.2020.100674.
- [10] S. Siah Chehreh Ghadikolaie, “Solar photovoltaic cells performance improvement by cooling technology: An overall review,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 18, pp. 10939–10972, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.12.164.
- [11] T. Nabil and T. M. Mansour, “Enhancing photovoltaic panel efficiency with innovative cooling Technologies: An experimental approach,” *Appl Therm Eng*, vol. 253, p. 123846, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123846.
- [12] A. Kasaeian, Y. Khanjari, S. Golzari, O. Mahian, and S. Wongwises, “Effects of forced convection on the performance of a photovoltaic thermal system: An experimental study,” *Exp Therm Fluid Sci*, vol. 85, pp. 13–21, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2017.02.012.

- [13] G. Barone, A. Buonomano, C. Forzano, A. Palombo, and O. Panagopoulos, "Photovoltaic thermal collectors: Experimental analysis and simulation model of an innovative low-cost water-based prototype," *Energy*, vol. 179, pp. 502–516, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.04.140.
- [14] A. L. Abdullah, S. Misha, N. Tamaldin, M. A. M. Rosli, and F. A. Sachit, "Theoretical study and indoor experimental validation of performance of the new photovoltaic thermal solar collector (PVT) based water system," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 18, p. 100595, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.csite.2020.100595.
- [15] I. O. Harmailil, S. M. Sultan, C. P. Tso, A. Fudholi, M. Mohammad, and A. Ibrahim, "A review on recent photovoltaic module cooling techniques: Types and assessment methods," *Results in Engineering*, vol. 22, p. 102225, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102225.
- [16] F. Grubišić-Čabo, S. Nižetić, D. Čoko, I. Marinić Kragić, and A. Papadopoulos, "Experimental investigation of the passive cooled free-standing photovoltaic panel with fixed aluminum fins on the backside surface," *J Clean Prod*, vol. 176, pp. 119–129, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.12.149.
- [17] J. Zhao, Z. Li, and T. Ma, "Performance analysis of a photovoltaic panel integrated with phase change material," *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 1093–1098, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.264.
- [18] D. N. Kossyvakis, G. D. Voutsinas, and E. V. Hristoforou, "Experimental analysis and performance evaluation of a tandem photovoltaic–thermoelectric hybrid system," *Energy Convers Manag*, vol. 117, pp. 490–500, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.03.023.
- [19] E. Özbaş, "A novel design of passive cooler for PV with PCM and two-phase closed thermosyphons," *Solar Energy*, vol. 245, pp. 19–24, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.solener.2022.08.072.
- [20] J. M. Mahdi, H. I. Mohammed, and P. Talebizadehsardari, "A new approach for employing multiple PCMs in the passive thermal management of photovoltaic modules," *Solar Energy*, vol. 222, pp. 160–174, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.04.044.
- [21] Z. Said, F. F. Ahmad, A. M. Radwan, and A. A. Hachicha, "New thermal management technique for PV module using Mist/PCM/Husk: An experimental study," *J Clean Prod*, vol. 401, p. 136798, May 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.136798.
- [22] S. Rubaiee and M. A. Fazal, "The Influence of Various Solar Radiations on the Efficiency of a Photovoltaic Solar Module Integrated with a Passive Cooling System," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 24, p. 9584, Dec. 2022, doi: 10.3390/en15249584.
- [23] S. Sargunanathan, A. Elango, and S. T. Mohideen, "Performance enhancement of solar photovoltaic cells using effective cooling methods: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 64, pp. 382–393, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.06.024.
- [24] H. M. Ali, "Recent advancements in PV cooling and efficiency enhancement integrating phase change materials based systems – A comprehensive review," *Solar Energy*, vol. 197, pp. 163–198, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2019.11.075.

- [25] M. A. Sheik *et al.*, “A comprehensive review on recent advancements in cooling of solar photovoltaic systems using phase change materials,” *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 17, pp. 768–783, Feb. 2022, doi: 10.1093/ijlct/ctac053.
- [26] M. Sharaf, M. S. Yousef, and A. S. Huzayyin, “Review of cooling techniques used to enhance the efficiency of photovoltaic power systems,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 29, no. 18, pp. 26131–26159, Apr. 2022, doi: 10.1007/s11356-022-18719-9.
- [27] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, and D. Buddhi, “Review on thermal energy storage with phase change materials and applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 2, pp. 318–345, Feb. 2009, doi: 10.1016/j.rser.2007.10.005.
- [28] S. F. Ahmed *et al.*, “Integration of phase change materials in improving the performance of heating, cooling, and clean energy storage systems: An overview,” *J Clean Prod*, vol. 364, p. 132639, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132639.
- [29] M. M. Farid, A. M. Khudhair, S. A. K. Razack, and S. Al-Hallaj, “A review on phase change energy storage: materials and applications,” *Energy Convers Manag*, vol. 45, no. 9–10, pp. 1597–1615, Jun. 2004, doi: 10.1016/j.enconman.2003.09.015.
- [30] M. F. Junaid *et al.*, “Inorganic phase change materials in thermal energy storage: A review on perspectives and technological advances in building applications,” *Energy Build*, vol. 252, p. 111443, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111443.
- [31] M. Sun *et al.*, “A review on thermal energy storage with eutectic phase change materials: Fundamentals and applications,” *J Energy Storage*, vol. 68, p. 107713, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.107713.
- [32] M. Jurčević, S. Nižetić, I. Marinić-Kragić, M. Jakić, and M. Arıcı, “Towards resilient operation of photovoltaic-thermal collector with incorporated organic phase change material: Numerical and experimental investigation,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 60, p. 103465, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.seta.2023.103465.
- [33] M. Jurčević, S. Nižetić, M. Arıcı, A. T. Hoang, E. Giama, and A. Papadopoulos, “Thermal constant analysis of phase change nanocomposites and discussion on selection strategies with respect to economic constraints,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 43, p. 100957, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.seta.2020.100957.
- [34] M. Tian *et al.*, “Modified Al@Al₂O₃ phase change materials by carbon via in-situ catalytic decomposition of methane,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 200, p. 109924, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.solmat.2019.109924.
- [35] P. Singh *et al.*, “Solar Photovoltaic Panels with Finned Phase Change Material Heat Sinks,” *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 10, p. 2558, May 2020, doi: 10.3390/en13102558.
- [36] E. B. Agyekum, S. PraveenKumar, N. T. Alwan, V. I. Velkin, and T. S. Adebayo, “Experimental Study on Performance Enhancement of a Photovoltaic Module Using a Combination of Phase Change Material and Aluminum Fins—Exergy, Energy and Economic (3E) Analysis,” *Inventions*, vol. 6, no. 4, p. 69, Oct. 2021, doi: 10.3390/inventions6040069.

- [37] A. A. Alwan and A. M. Hassan, "Experimental Study on Optimizing Photovoltaic Panel Efficiency: Harnessing Paraffin Wax Phase Change for Temperature Reduction," *Arab J Sci Eng*, 2024, doi: 10.1007/s13369-023-08581-3.
- [38] H. Al-Lami, N. N. Al-Mayyahi, Q. Al-Yasiri, R. Ali, and A. Alshara, "Performance enhancement of photovoltaic module using finned phase change material panel: An experimental study under Iraq hot climate conditions," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 44, no. 3, pp. 6886–6897, Sep. 2022, doi: 10.1080/15567036.2022.2103601.
- [39] A. Ekiz, S. Selimli, and H. Dumrul, "An Experimental Study of the Effects of Heat-Sink Surface Form on PV Module Cooling and Electrical Performance," *Journal of Energy Engineering*, vol. 149, no. 2, Apr. 2023, doi: 10.1061/jleed9.eyeng-4572.
- [40] M. A. Fazal and S. Rubaiee, "Power output enhancement in photovoltaic systems through integration of TiO₂-doped phase change material," *J Therm Anal Calorim*, vol. 148, no. 20, pp. 11093–11101, Oct. 2023, doi: 10.1007/s10973-023-12405-9.
- [41] Noor Abbas Hindi, Saadoon Fahad Dakhil, and Karrar Abdullah Abbas, "Experimental Study to Improve Solar Photovoltaic Performance by Utilizing PCM and Finned Wall," *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, vol. 102, no. 1, pp. 153–170, Feb. 2023, doi: 10.37934/arfmts.102.1.153170.
- [42] A. R. Abdulmunem, P. Mohd Samin, H. Abdul Rahman, H. A. Hussien, I. Izmi Mazali, and H. Ghazali, "Numerical and experimental analysis of the tilt angle's effects on the characteristics of the melting process of PCM-based as PV cell's backside heat sink," *Renew Energy*, vol. 173, pp. 520–530, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.04.014.
- [43] A. R. Abdulmunem, P. Mohd. Samin, H. A. Rahman, H. A. Hussien, and H. Ghazali, "A novel thermal regulation method for photovoltaic panels using porous metals filled with phase change material and nanoparticle additives," *J Energy Storage*, vol. 39, p. 102621, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.102621.
- [44] S. Nižetić, M. Jurčević, D. Čoko, and M. Arıcı, "A novel and effective passive cooling strategy for photovoltaic panel," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 145, p. 111164, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111164.
- [45] M. M. Bayat, E. Buyruk, and A. Can, "Experimental Investigation of PV Panel Performance by Using PCM with Different Fin Geometries," *Transactions of FAMENA*, vol. 47, no. 4, pp. 97–108, 2023, doi: 10.21278/TOF.474056223.
- [46] A. D. Tuncer, E. Y. Gürbüz, İ. Şahinkesen, A. Georgiev, and A. Keçebaş, "Passive cooling of photovoltaic panels with latent heat storage unit: Analyzing the effects of using fins and iron nanoparticles on the performance, economy and environmental impact," *Energy*, vol. 288, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.energy.2023.129860.
- [47] M. Sharaf, M. S. Yousef, and A. S. Huzayyin, "Year-round energy and exergy performance investigation of a photovoltaic panel coupled with metal foam/phase change material composite," *Renew Energy*, vol. 189, pp. 777–789, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.03.071.

- [48] Y. Sheikh, M. Jasim, M. Qasim, A. Qaisieh, M. O. Hamdan, and F. Abed, "Enhancing PV solar panel efficiency through integration with a passive Multi-layered PCMs cooling system: A numerical study," *International Journal of Thermofluids*, vol. 23, p. 100748, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.ijft.2024.100748.
- [49] M. Sharaf, A. S. Huzayyin, and M. S. Yousef, "Performance enhancement of photovoltaic cells using phase change material (PCM) in winter," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 6, pp. 4229–4239, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.aej.2021.09.044.
- [50] A. Durez, M. U. Sohail, M. Ali, and U. A. Khan, "Thermal analysis and efficiency enhancement of solar modified PV panels through organic PCM under climate conditions of Pakistan," *Mehran University Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 43, no. 1, p. 97, Jan. 2024, doi: 10.22581/muet1982.2401.2679.
- [51] A. Durez, M. Ali, A. Waqas, K. Nazir, and S. Kumarasamy, "Modelling and optimization of phase change materials (PCM)-based passive cooling of solar PV panels in multi climate conditions," *Front Energy Res*, vol. 11, Jun. 2023, doi: 10.3389/fenrg.2023.1121138.
- [52] A. Ahmad, H. Navarro, S. Ghosh, Y. Ding, and J. N. Roy, "Evaluation of New PCM/PV Configurations for Electrical Energy Efficiency Improvement through Thermal Management of PV Systems," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 14, p. 4130, Jul. 2021, doi: 10.3390/en14144130.
- [53] J. Pu, J. Du, B. Zhang, F. Rong, F. Jiao, and Y. Hong, "Thermal management enhancement of photovoltaic panels using phase change material heat sinks with various T-shaped fins," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 61, p. 104991, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.csite.2024.104991.
- [54] A. Mahdavi, M. Farhadi, M. Gorji-Bandpy, and A. Mahmoudi, "A comprehensive study on passive cooling of a PV device using PCM and various fin configurations: Pin, spring, and Y-shaped fins," *Appl Therm Eng*, vol. 252, p. 123519, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123519.
- [55] S. Aneli, R. Arena, and A. Gagliano, "Numerical Simulations of a PV Module with Phase Change Material (PV-PCM) under Variable Weather Conditions," *International Journal of Heat and Technology*, vol. 39, no. 2, pp. 643–652, Apr. 2021, doi: 10.18280/ijht.390236.
- [56] M. A. Qasim *et al.*, "The effect of using hybrid phase change materials on thermal management of photovoltaic panels – An experimental study," *Solar Energy*, vol. 209, pp. 415–423, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.09.027.
- [57] R. Lamba, F. J. Montero, T. ur Rehman, S. Singh, and S. Manikandan, "PCM-based hybrid thermal management system for photovoltaic modules: A comparative analysis," *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, doi: 10.1007/s11356-023-27809-1.
- [58] A. Naseer *et al.*, "Role of phase change materials thickness for photovoltaic thermal management," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 49, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.seta.2021.101719.
- [59] A. Malvika, U. C. Arunachala, and K. Varun, "Sustainable passive cooling strategy for photovoltaic module using burlap fabric-gravity assisted flow: A comparative Energy, exergy, economic, and

- enviroeconomic analysis,” *Appl Energy*, vol. 326, p. 120036, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120036.
- [60] V. Ranawade and K. S. Nalwa, “Multilayered PCMs-based cooling solution for photovoltaic modules: Modelling and experimental study,” *Renew Energy*, vol. 216, p. 119136, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.119136.
- [61] S. K. Marudaipillai, B. Karuppudayar Ramaraj, R. K. Kottala, and M. Lakshmanan, “Experimental study on thermal management and performance improvement of solar PV panel cooling using form stable phase change material,” *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, vol. 45, no. 1, pp. 160–177, 2023, doi: 10.1080/15567036.2020.1806409.
- [62] M. Moein-Jahromi, H. Rahmanian-Koushkaki, S. Rahmanian, and S. Pilban Jahromi, “Evaluation of nanostructured GNP and CuO compositions in PCM-based heat sinks for photovoltaic systems,” *J Energy Storage*, vol. 53, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.105240.
- [63] G. Xie *et al.*, “Simulation of natural convection of n-Hexadecane paraffin inside a porous chamber,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 38, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.csite.2022.102275.
- [64] F. A. Díaz, N. O. Moraga, and R. C. Cabrales, “Computational modeling of a PV-PCM passive cooling system during a day–night cycle at arid and semi-arid climate zones,” *Energy Convers Manag*, vol. 270, p. 116202, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.116202.
- [65] S. Homlakorn, A. Suksri, and T. Wongwuttanasatian, “Efficiency improvement of PV module using a binary-organic eutectic phase change material in a finned container,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 121–128, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.05.147.
- [66] K. Velmurugan *et al.*, “Experimental studies on photovoltaic module temperature reduction using eutectic cold phase change material,” *Solar Energy*, vol. 209, pp. 302–315, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.09.010.
- [67] S. Y. Khan *et al.*, “Experimental, numerical, and 4E assessment of photovoltaic module using macro-encapsulation of pure and nano phase change material: A comparative analysis,” *Energy*, vol. 290, p. 130162, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.energy.2023.130162.
- [68] M. A. Mohammed, B. M. Ali, K. F. Yassin, O. M. Ali, and O. R. Alomar, “Comparative study of different phase change materials on the thermal performance of photovoltaic cells in Iraq’s climate conditions,” *Energy Reports*, vol. 11, pp. 18–27, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.egyr.2023.11.022.
- [69] Z. Arifin, S. D. Prasetyo, B. A. Tribhuwana, D. D. D. P. Tjahjana, R. A. Rachmanto, and B. Kristiawan, “Photovoltaic Performance Improvement with Phase Change Material Cooling Treatment,” *International Journal of Heat and Technology*, vol. 40, no. 4, pp. 953–960, Aug. 2022, doi: 10.18280/ijht.400412.
- [70] Z. Arifin *et al.*, “The Effect of Soybean Wax as a Phase Change Material on the Cooling Performance of Photovoltaic Solar Panel,” *International Journal of Heat and Technology*, vol. 40, no. 1, pp. 326–332, Feb. 2022, doi: 10.18280/ijht.400139.

- [71] Mohd Afzanizam Mohd Rosli *et al.*, "Parametric Study of Photovoltaic System Integrated with Organic Phase Change Material using ANSYS," *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, vol. 106, no. 1, pp. 76–89, Jun. 2023, doi: 10.37934/arfmts.106.1.7689.
- [72] T. Wongwuttanasatian, T. Sarikarin, and A. Suksri, "Performance enhancement of a photovoltaic module by passive cooling using phase change material in a finned container heat sink," *Solar Energy*, vol. 195, pp. 47–53, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2019.11.053.
- [73] R. Madurai Elavarasan, M. Nadarajah, R. Pugazhendhi, and S. Gangatharan, "An experimental investigation on coalescing the potentiality of PCM, fins and water to achieve sturdy cooling effect on PV panels," *Appl Energy*, vol. 356, p. 122371, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.122371.
- [74] E. Sen and M. S. Celiktas, "Performance evaluation and thermal stabilization of photovoltaic panels using phase-change materials," *Energy*, vol. 302, p. 131840, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.131840.
- [75] M. Rezvanpour, D. Borooghani, F. Torabi, and M. Pazoki, "Using $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ as a phase change material for thermo-regulation and enhancing photovoltaic panels' conversion efficiency: Experimental study and TRNSYS validation," *Renew Energy*, vol. 146, pp. 1907–1921, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.07.075.
- [76] P. Singh, V. Mudgal, S. Khanna, T. K. Mallick, and K. S. Reddy, "Experimental investigation of solar photovoltaic panel integrated with phase change material and multiple conductivity-enhancing-containers," *Energy*, vol. 205, p. 118047, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.118047.
- [77] A. Khan, N. Shahzad, A. Waqas, M. Mahmood, M. Ali, and S. Umar, "Unlocking the potential of passive cooling: A comprehensive experimental study of PV/PCM/TEC hybrid system for enhanced photovoltaic performance," *J Energy Storage*, vol. 80, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.est.2023.110277.
- [78] N. Abdollahi and M. Rahimi, "Potential of water natural circulation coupled with nano-enhanced PCM for PV module cooling," *Renew Energy*, vol. 147, pp. 302–309, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.09.002.
- [79] R. Pichandi, K. Murugavel Kulandaivelu, K. Alagar, H. K. Dhevaguru, and S. Ganesamoorthy, "Performance enhancement of photovoltaic module by integrating eutectic inorganic phase change material," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, pp. 1–18, Sep. 2020, doi: 10.1080/15567036.2020.1817185.
- [80] M. Moein-Jahromi, H. Rahmanian-Koushkaki, S. Rahmanian, and S. Pilban Jahromi, "Evaluation of nanostructured GNP and CuO compositions in PCM-based heat sinks for photovoltaic systems," *J Energy Storage*, vol. 53, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.105240.
- [81] K. Khanafer, A. Al-Masri, A. Marafie, and K. Vafai, "Thermal performance of solar photovoltaic panel in hot climatic regions: Applicability and optimization analysis of PCM materials," *Numeri Heat Transf A Appl*, 2023, doi: 10.1080/10407782.2023.2207732.

- [82] A. Ekiz, S. Selimli, and H. Dumrul, "An Experimental Study of the Effects of Heat-Sink Surface Form on PV Module Cooling and Electrical Performance," *Journal of Energy Engineering*, vol. 149, no. 2, Apr. 2023, doi: 10.1061/jleed9.eyeng-4572.
- [83] A. R. Abdulmunem, P. Mohd. Samin, H. A. Rahman, H. A. Hussien, and H. Ghazali, "A novel thermal regulation method for photovoltaic panels using porous metals filled with phase change material and nanoparticle additives," *J Energy Storage*, vol. 39, p. 102621, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.102621.
- [84] A. Al Miaari, K. O. Mohaisen, A. Al-Ahmed, and H. M. Ali, "Experimental investigation on thermal management and performance enhancement of photovoltaic panel cooled by a sustainable shape stabilized phase change material," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 67, p. 105763, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.csite.2025.105763.
- [85] J. D. Williams and G. P. Peterson, "A Review of Thermal Property Enhancements of Low-Temperature Nano-Enhanced Phase Change Materials," *Nanomaterials*, vol. 11, no. 10, p. 2578, Sep. 2021, doi: 10.3390/nano11102578.
- [86] Y.-W. Huang, M. Cambre, and H.-J. Lee, "The Toxicity of Nanoparticles Depends on Multiple Molecular and Physicochemical Mechanisms," *Int J Mol Sci*, vol. 18, no. 12, p. 2702, Dec. 2017, doi: 10.3390/ijms18122702.
- [87] K. Khanafer, A. Al-Masri, A. Marafie, and K. Vafai, "Thermal performance of solar photovoltaic panel in hot climatic regions: Applicability and optimization analysis of PCM materials," *Numeri Heat Transf A Appl*, 2023, doi: 10.1080/10407782.2023.2207732.
- [88] M. Firoozzadeh and A. H. Shiravi, "Simultaneous use of porous medium and phase change material as coolant of photovoltaic modules; thermodynamic analysis," *J Energy Storage*, vol. 54, p. 105276, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.105276.
- [89] S. M. Pourkiaei *et al.*, "Thermoelectric cooler and thermoelectric generator devices: A review of present and potential applications, modeling and materials," *Energy*, vol. 186, p. 115849, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.07.179.
- [90] M. Akbari, R. Mohammadi, K. Zamanpour, M. A. Vaziri Rad, L. Fereidooni, and A. Kasaeian, "Experimental investigation of photovoltaic passive cooling methods using low-cost metallic, ceramic, and cellulose porous media," *Energy Conversion and Management: X*, vol. 27, p. 101040, Jul. 2025, doi: 10.1016/j.ecmx.2025.101040.

POPIS OZNAKA I KRATICA

AMF	<i>Aluminum Metal Foam</i>	Aluminijska metalna pjena
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>	Računalna dinamika fluida
CFM	<i>Copper foam matrix</i>	Bakrena pjenasta matrica
CFN	<i>Concentrated photovoltaic</i>	Koncentriran fotonaponski
DSC	<i>Differential scanning calorimetry</i>	Diferencijalna skenirajuća kalorimetrija
FN	<i>Photovoltaic</i>	Fotonaponski
FPM	<i>Phase change material</i>	Fazno promjenjivi materijal
FN-FPM	<i>Photovoltaic panel–Phase Change Material</i>	Fotonaponski panel s fazno promjenjivim materijalom
FN/T	<i>Photovoltaic/thermal</i>	Fotonaponski/toplinski
GNP	<i>Graphene nanoparticles</i>	Grafenske nanočestice
HS	<i>Heat sink</i>	Rashladni element
LHSU	<i>Latent heat storage unit</i>	Jedinica za pohranu latentne topline
MWCNT	<i>Multi-walled carbon nanotubes</i>	Višestijenske ugljikove nanocijevi
NAT	<i>Sodium acetate trihydrate</i>	Natrijev acetat-trihidrat
RC	<i>Radiative cooling</i>	Radiativno hlađenje
RT		Rubitherm
TEC	<i>Thermoelectric cooler</i>	Termoelektrički hladnjak

SAŽETAK

Pasivno hlađenje fotonaponskih (FN) panela pomoću materijala s faznom promjenom (FPM) predstavlja strategiju za poboljšanje učinkovitosti i vijeka trajanja FN sustava. FPM-ovi se odlikuju sposobnošću učinkovite uprave toplinskom energijom, uključujući njeno apsorbiranje, pohranu i oslobađanje, što pomaže stabilizirati temperaturu i poboljšati ukupne performanse sustava. Ovaj pregled popunjava prazninu u postojećoj literaturi pružajući sveobuhvatan pregled pasivnog hlađenja FN panela pomoću FPM tehnologije u posljednjih šest godina. Naglašava potrebu za ažuriranjem i objedinjavanjem najnovijih istraživačkih nalaza kako bi se pružio cjelovit prikaz najnovijih dostignuća na ovom području.

Ovaj kvalifikacijski rad pruža detaljnu analizu različitih FPM-ova korištenih u tim istraživanjima, uključujući njihove ključne toplinske i fizičke karakteristike, budući da su one presudne za razumijevanje kako FPM utječe na performanse i trajnost FN panela. Osim toga, rad kategorizira pregledane studije prema različitim FN-FPM konfiguracijama, uključujući sustave s jednom slojem (poput čistog FPM-a, FPM-a s dodatcima i FPM-a u pjenu), višeslojne sustave, FPM u cijevima te kombinacije FPM-a s drugim pasivnim tehnikama. Svaka konfiguracija detaljno je opisana, a glavni rezultati, zaključci i ograničenja tih studija su prikazani. Dalje, razmatraju se ekonomski i okolišni aspekti istraživanja te se ističu njihovi širi učinci. Na kraju, istaknuti su mogući smjerovi budućih istraživanja u ovom području i oni su detaljno razmotreni. Naglašava se da su potrebna daljnja istraživanja radi optimizacije performansi FPM-a, integracije naprednih materijala i istraživanja inovativnih konfiguracija kako bi se poboljšala učinkovitost i održivost FN-FPM sustava.

Ključne riječi: Fotonaponski panel (FN), pasivno hlađenje, materijali s faznom promjenom (FPM), solarna energija, obnovljivi izvori energije