

JAHONDA HAVOLI QUYOSH FOTOELEKTRIK-ISSIIQLIK TIZIMLARIDAN FOYDALANISHNING ZAMONAVIY HOLATI

J.R Qodirov

Buxoro davlat universiteti

U.X Ibragimov

Qarshi davlat texnika universiteti.

Annotatsiya. Fotoelektrik-issiqlik (PVT) tizimidan keng foydalanish asosida olingan issiq havodan qo'shimcha foydalanish barqaror energetikani kelajakdagi rivoji uchun eng samarali usullardan biri hisoblanadi. Demak, PVT tizimdan foydalanish o'z navbatida FEMning elektrik samaradorligini, shuningdek PVT tizimdan olingan issiq havodan isituvchi muhit sifatida foydalanish tizimning umumiy samaradorligi sezilarli oshiradi. Ushbu maqolada Quyosh fotoelektrik modullarini turli xil usullar yordamida sovitish metodlari, bunda olingan issiq havo binolarni isitishda va quritish qurilmalarida issiqlik manbai sifatida xizmat qilishi, ularning istiqbollari, oddiy havoli PVT tizimga nisbatan modifikatsiyalangan tizimning issiqlik FIK qiymatlari haqida dunyo olimlari tomonidan olib borilgan ilmiy tadqiqot ishlari taxlil qilingan.

Kalit so'zlar: quyosh fotoelektrik modul, sovitish, kollektor, passiv, aktiv, radiator, samaradorlik, quvvat.

Аннотация. Широкое применение фотоэлектрически-тепловых (PVT) систем и последующее использование получаемого горячего воздуха является одним из наиболее эффективных путей дальнейшего развития устойчивой энергетики. Использование PVT-системы, в свою очередь, заметно повышает электрическую эффективность солнечных фотоэлектрических модулей (ФЭМ), а также общую эффективность установки благодаря применению нагретого в PVT-системе воздуха в качестве теплоносителя. В данной статье проанализированы исследования учёных со всего мира, посвящённые различным методам охлаждения солнечных фотоэлектрических модулей, перспективам применения получаемого горячего воздуха для обогрева зданий и в сушильных установках, а также значениям теплового КПД модифицированной системы по сравнению с обычной воздушной PVT-системой.

Ключевые слова: солнечный фотоэлектрический модуль, охлаждение, коллектор, пассивный, активный, радиатор, эффективность, мощность.

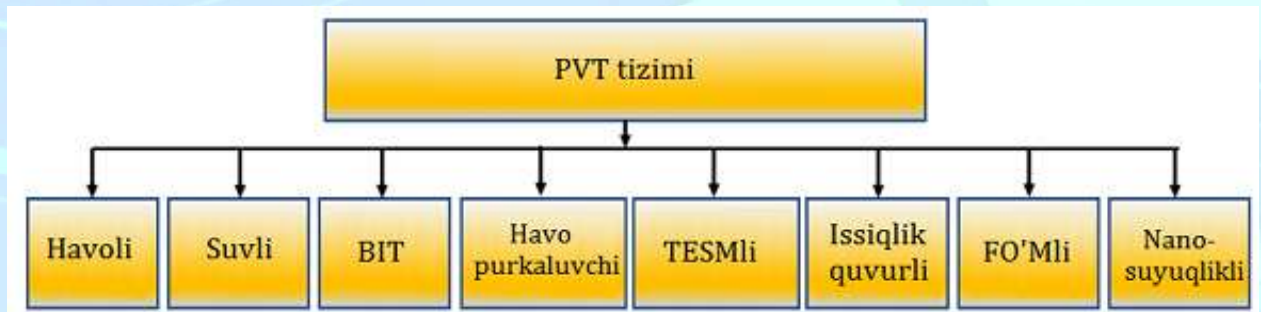
Abstract: The widespread use of photovoltaic-thermal (PVT) systems and the subsequent utilization of the hot air generated is considered one of the most effective approaches for the future development of sustainable energy. The use of PVT systems significantly enhances the electrical efficiency of solar photovoltaic

modules (PV), as well as the overall efficiency of the system by employing the heated air from the PVT system as a heat transfer medium. This article analyzes scientific studies conducted by researchers worldwide on various methods of cooling solar photovoltaic modules, the prospects of using the generated hot air for space heating and in drying systems, and the thermal efficiency values of a modified system compared to a conventional air-based PVT system.

Keywords: solar photovoltaic module, cooling, collector, passive, active, radiator, efficiency, power.

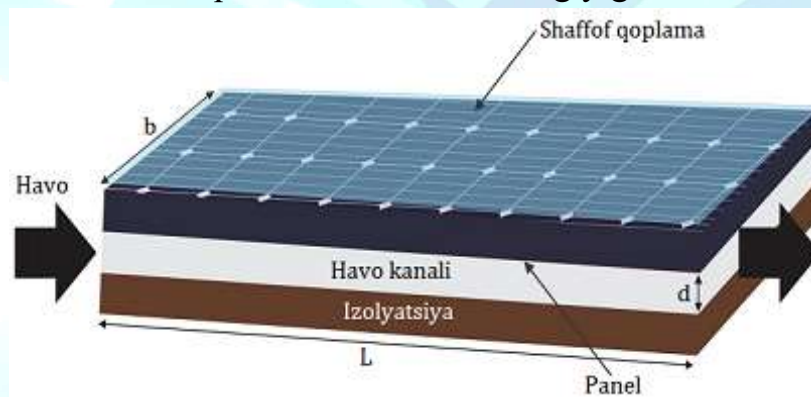
Kirish

Hozirgi kunda barqaror rivojlanishning maqsadi Yer yuzida sog‘lom muhitni tiklash va kelajak avlod uchun toza ekologik muhitni ta‘minlashdan iborat. Ushbu maqsadlarga erishish uchun qayta tiklanadigan energiya manbalaridan (QTEM), xususan quyosh fotoelektrik tizimlaridan foydalanish yaxshi samara beradi. Quyosh fotoelektrik panellari (FEP) jami tushayotgan quyosh nurlanish energiyasini 15-20% qismini elektr energiyasiga o‘zgartirish samaradorligiga ega. Quyosh nurlanish energiyasining qolgan qismi issiqlik energiyasiga o‘zgaradi va ushbu energiya FEPning haroratini tashqi muhit haroratiga nisbatan 40°C gacha oshiradi [1]. Natijada quyosh FEPlarining haroratini 1°C ga ortishi, uning elektrik samaradorligini o‘rtacha 0,25...0,5% gacha kamaytiradi [2]. Vaqt o‘tishi bilan takrorlanuvchi issiqlik ta‘siri FEPning strukturasini zararlanishiga va FEPning xizmat ko‘rsatish muddatini qisqarishiga olib keladi [3]. Chauhan va boshqalarning [4] ta‘kidlashicha, FEP ishlaganda haroratni har 10°C ga ortishi FEPning ishdan chiqishini ikki marta tezlashtiradi. Ushbu muammolarni hal etishning eng maqbul usuli quyosh FEPlarini sovitish hisobiga tizimning samaradorligini oshirish hisoblanadi [5]. Quyosh FEPni sovitish orqali bir vaqtning o‘zida elektr va issiqlik energiyasini ishlab chiqarish imkonini beradigan tizim-fotoelektrik-issiqlik (PVT) tizim deb ataladi [6]. PVT innovatsion tizimi FEPning haroratini sezilarli pasaytiradi, samaradorlikni oshiradi va ekspluatatsiya harajatlarini minimal qiymatgacha tushirish imkonini beradi. PVT tizimi nazariyasi 1978 yilda Kern va Russellar [7] tomonidan FEPlarni sovitish maqsadida ilgari surilgan. Hozirgi kunda PVT tizimlari turli maqsadlarda quyosh havoli isitish tizimlari, issiq suv ishlab chiqarish va suzish havzalarini isitishda qo‘llaniladi [8]. PVT tizimlarining tasnifi 1-rasmda ko‘rsatilgan.



1-rasm. PVT tizimlarining tasnifi

Havoli PVT tizimining konstruksiyasi 2-rasmda ko'rsatilgan bo'lib, ular bir-biridan havo kanalining holatiga bog'liq holda farqlanadi. PVT tizimining umumiy samaradorligi elektr va issiqlik samaradorliklarning yig'indisi hisoblanadi [9-10].



2-rasm. Havoli PVT tizimining qatlamlari sxemasi

Jahonda 2023 yilda PVT tizimlarning umumiy o'rnatilgan quvvati 822 MVt issiqlik energiyasi va 292 MVt elektr energiyasini (umumiy maydoni 1589553 m^2) tashkil etdi. PVT tizimlarning asosiy qismi Yevropada 1011212 m^2 , Osiyoda 318329 m^2 va Xitoyda 146926 m^2 o'rnatilgan bo'lib, qolgan qismi Afrika, AQSh, Kanada, Avstraliya va Janubiy Amerika hissasiga to'g'ri keladi [11]. PVT tizimlardan foydalanish sur'atini yildan-yilga ortib borishi ushbu tizimlarning samaradorligini oshirish bo'yicha ko'p sonli tadqiqotlarni amalga oshirilganligi bilan bog'liq. Özakin va Kayalar [12] tomonidan havoli PVT tizimlarning energetik va eksergetik tahlili, panel yuzasida haroratni taqsimlanishi va sovitish kanalida havoning tezligini taqsimlanishi ANSYS Fluent dasturiy vositasidan foydalanib tadqiqot qilingan (3-rasm). Model natijalari tajriba natijalari bilan taqqoslangan. Natijalarga ko'ra, polikristal va monokristal panellar uchun eksergetik FIK qiymati taxminan 70% va 30% ga, issiqlik FIK qiymati 55% va 70% ga ortgan. FEPning harorati ikkita panel uchun 10-15°C ga pasaygan.



3-rasm. Tajriba qurilmasining umumiy ko‘rinishi (a) va nazorat hajmi (b)

Srimanickam va boshqalar [13] tomonidan havoli PVT tizim energetik va eksergetik tahlil qilingan. Tadqiqotda quyosh nurlanishi, kuchlanish, tok, tashqi muhit harorati, FEP harorati, havoning kirish va chiqishdagi haroratlari ko‘rib chiqilgan. Natijalarga ko‘ra, issiqlik, elektrik, umumiy energetik va umumiy eksergetik samaradorliklar mos ravishda 24,17%, 9,78%, 44,84% va 11,23% ni tashkil etgan. Bahtiar va boshqalar [14] PVT tizimning xarakteristikasini tajribaviy tadqiqot qilishgan. Natijalarga ko‘ra, eksergetik samaradorlik 98,11% ni tashkil etgan. Ooshaksaraei va boshqalar [15] PVT tizimning to‘rtta modelini ishlab chiqishgan: bir yo‘lli, ikki yo‘lli parallel oqimli, ikki yo‘lli qarama-qarshi oqimli va ikki yo‘lli teskari oqimli. Natijalarga ko‘ra, ikki yo‘lli parallel oqimli ikki tomonli PVT tizim eng yuqori umumiy samaradorlikka, shuningdek, bir yo‘lli PVT tizim eng yuqori elektr samaradorlikka ega bo‘lgan.

Mojumder va boshqalar [16] havoning massaviy sarfi 0,02 dan 0,14 kg/s gacha o‘zgarganda metal qovurg‘alarga ega havoli PVT tizimini tadqiqot qilishgan. Natijalarga ko‘ra, havoning massaviy sarfi 0,14 kg/s bo‘lganda to‘rtta qovurg‘ali PVT tizimning maksimal issiqlik va elektrik quvvati mos ravishda 56,19% va 13,75% ni tashkil etgan. Popovici va boshqalar [17] havo bilan sovitiladigan FEPda radiatorlarning turli konfiguratsiyalaridan foydalanilganda FEPning haroratini pasayishini sonli tadqiqot qilishgan. Ularning ta’kidlashicha, radiatorli FEPda harorat an’anaviy FEPga nisbatan 10°C ga past bo‘lgan va elektr energiyasini chiqishi 6,97-7,55% gacha ortgan. Jha va boshqalar [18] Hindistonning shimoli-sharqida joylashgan Silchar hududida havoli PVT tizimni energetik va eksergetik tahlil qilishgan, bunda havoning massaviy sarfi 0,007 dan 0,0128 kg/s gacha o‘zgargan. Tadqiqot jarayonida panel harorati, havoning chiqishdagi harorati, energiya va eksergiyani ortishi hamda havoning massaviy sarfi o‘rganilgan. Natijalarga ko‘ra, energiya va eksergiyani ortishi dekabr oyida 152 $Vt \cdot soat$ va 7,88 $Vt \cdot soat$, mart oyida 185 $Vt \cdot soat$ va 17,82 $Vt \cdot soat$ ni tashkil etgan. Singh va boshqalar [19] havo oqimi konfiguratsiyasi bir va ikki kanalli bo‘lgan ikki kanalli yarim shaffof PVT tizimni modellashtirishgan va tadqiqot qilishgan. Natijalarga ko‘ra, taklif etilgan modifikatsiyada issiqlik, elektrik, umumiy va eksergetik

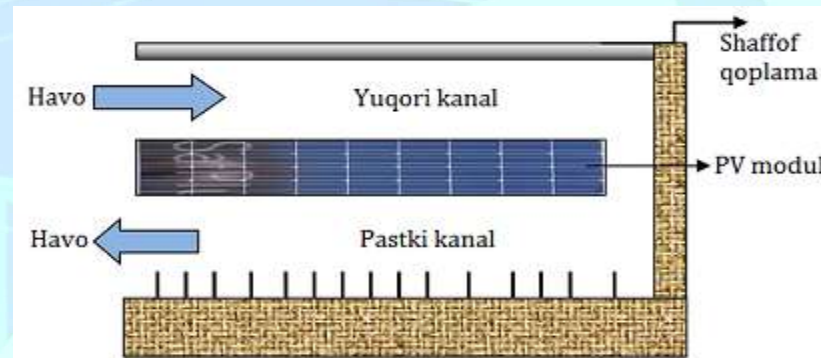
samaradorliklarni ortishi mos ravishda 34,57%, 5,78%, 35,41% va 71,5% ni tashkil etgan. Shuningdek, PVT tizimda harorat 43,11°C gacha pasaygan.

Agarwal va boshqalar [20] PVT tizimning ekspluatatsion xarakteristikasini tadqiqot qilishgan. PVT tizim bitta quyosh elementidan iborat bo'lib, uning ostida kanal hosil qilingan va ushbu kanaldan havo oqimi o'zgaras tok ventilyatori yordamida o'tkaziladi. Tajriba qurilmasi bir-biri bilan ketma-ket ulangan ikkita PVT tizimdan tashkil topgan. Taklif etilgan tajriba qurilmasining elektr va issiqlik FIK qiymati mos ravishda 12,4% va 35,7% ni tashkil etgan. Amori va boshqalar [21] havo kanali bir yo'lli bo'lgan PVT tizim orqali 0,0991 kg/s massaviy sarf bilan havo o'tkazilganda panel haroratining o'rtacha pasayishi 15,52°C ni tashkil etgan. PVT tizimning issiqlik, elektrik va umumiy FIK qiymatlari mos ravishda 46%, 9,4% va 55% ni ekanligi ta'kidlangan. Slimani va boshqalar [22] to'rtta turli PVT tizimning unumdorligiga shaffof qoplama va absorber plastinaning ta'sirini tajribaviy tadqiqot qilishgan. Natijalarga ko'ra, qo'shimcha shaffof qoplamali, ikki yo'lli havoli PVT tizimning umumiy FIK qiymati qolgan uchta konfiguratsiyaga qaraganda yuqori bo'lgan. Ikki yo'lli konstruksiyaning afzalligi shundaki, FEPni bir xilda sovitishni ta'minlaydi va harorat FEPning barcha yuzasida bir xil taqsimlanadi. Sopian va boshqalar [23] bir va ikki kanalli havoli PVT tizimni taqqoslash bo'yicha tadqiqotlar o'tkazishgan bo'lib, tajriba natijalariga ko'ra, umumiy FIK qiymati nuqtai nazaridan ikki yo'lli konstruksiya samarali ekanligi ta'kidlangan. Shuningdek, havoning massaviy sarfini ortishi bilan elektrik FIK qiymatini ortishini tasdiqlashgan. Tonui va Tripanagnostopouloslar [24] FEP yuzasidan kanal orqali oqib o'tayotgan ishchi jismga issiqlik uzatishni yaxshilash uchun alyuminiy qovurg'adan foydalanishni taklif etishgan (4-rasm).



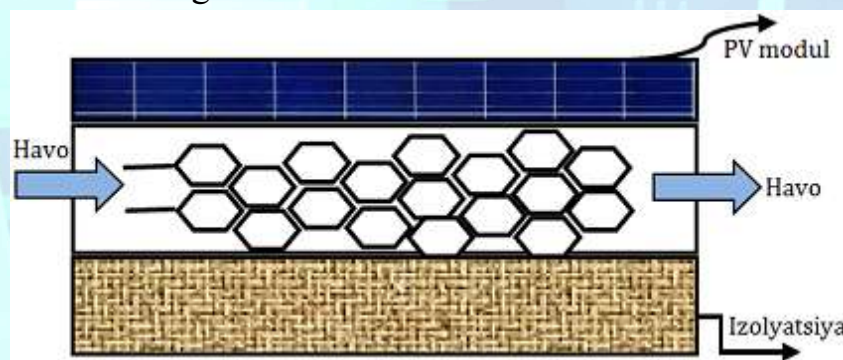
4-rasm. Modifikatsiyalangan havoli PVT tizim

Modifikatsiyalangan PVT tizimning unumdorligi oddiy PVT tizimga qaraganda ancha yuqori bo'lib, havo kanalidan issiqlik uzatishni jadallashtirish uchun to'rtburchak qovurg'adan foydalanilgan. Kumar va Rosenlar [25] oddiy havoli PVT tizim bilan pastki kanalida qovurg'a o'rnatilgan havoli PVT tizimlarni qiyosiy tadqiqot qilishgan (5-rasm).



5-rasm. Pastki kanalida qovurg'a o'rnatilgan ikki yo'lli havoli PVT tizimi

Natijalarga ko'ra, pastki kanalda qovurg'ani o'rnatilishi issiqlik va elektrik FIK qiymatlarini oddiy tizimga nisbatan 15,5% va 10,5% ga ortishiga olib kelgan. Jin va boshqalar [26] PVT tizimining havo kanalida to'g'ri burchakli tunnelli issiqlik almashinuv qurilmasidan foydalanib modifikatsiya qilishgan va uning unumdorligini oddiy havoli PVT tizim bilan taqqoslashgan. Tadqiqot natijalariga ko'ra, modifikatsiyalangan tizimning issiqlik va elektrik FIK qiymati mos ravishda 54,70% va 10,02% ni tashkil etgan. Hussain va boshqalar [27] PVT tizimning havo kanalida 6-rasmda ko'rsatilgan uyali issiqlik almashinuv qurilmasini o'rnatishni taklif etishgan. Tajriba tadqiqotlari natijasiga ko'ra, taklif etilgan tizimning issiqlik FIK qiymati sezilarli ortganli aniqlangan. Quyosh nurlanish intensivligi 828 Wt/m^2 va havoning massaviy sarfi $0,11 \text{ kg/s}$ bo'lganda tizimning issiqlik FIK qiymati 87% ni tashkil etgan.



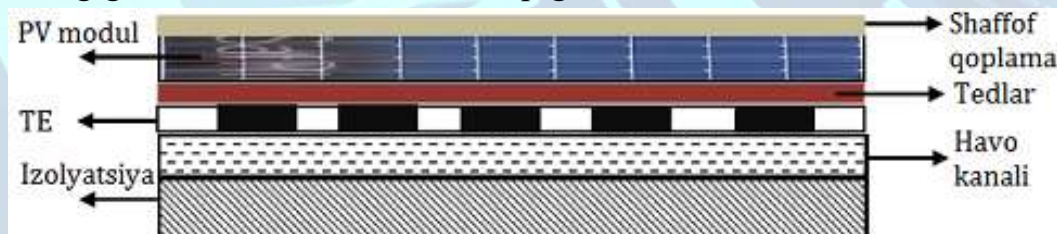
6-rasm. Uyali issiqlik almashinuv qurilmasi o'rnatilgan PVT tizim

Othman va boshqalar [28] PVT tizimning havo kanalida alyuminiy plastinadan tayyorlangan V-simon ariqchalardan foydalanish g'oyasini taklif etishgan. Tajriba tadqiqotlari asosida PVT tizimning issiqlik va elektrik FIK qiymatlari sezilarli ortganligi aniqlangan, bunda tizimning umumiy samaradorligi oddiy havoli tizimga nisbatan 17% ga ortgan. Havoli PVT tizimning unumdorligi havoning massaviy sarfiga sezilarli bog'liq bo'lib, havoning massaviy sarfi juda yuqori bo'lganda FEPdan ko'p miqdordagi issiqlik qabul qilinadi va modulning harorati sezilarli pasayadi. Kumar va Rosenlarning [24] ta'kidlashicha, havoning massaviy sarfi $0,03$ dan $0,15 \text{ kg/s}$ gacha ortganda PVT tizimning elektrik FIK

qiymati 20% gacha ortgan. Ahmed va Mohammedlar [29] havo kanalida g'ovak muhit joylashtirilgan ikki yo'lli havoli PVT tizimning unumdorligini tadqiqot qilishgan. Natijalarga ko'ra, oddiy havoli PVT tizimga nisbatan modifikatsiyalangan tizimning issiqlik FIK qiymati 80,23% ga ortgan, biroq elektrik FIK qiymati 8,70% ga kamaytgan.

Prashant va boshqalar [30] kanalida g'ovak muhit bo'lgan ikki yo'lli PVT tizimni tajribaviy tadqiqot qilishgan. Issiqlik energiyasini maksimal akkumulyatsiya qilish uchun FEPning ustki qismida ikki qatlamli shaffof qoplama qo'llanilgan, natijada tizimning issiqlik FIK qiymati 10-12% ga ortgan. Yousef va Adamlar [31] bir va ikki yo'lli havoli PVT tizimlarini taqqoslashgan va g'ovak muhitli tizimning issiqlik FIK qiymati oddiy havoli PVT tizimga qaraganda 10% ga yuqori ekanligini ta'kidlashgan. Sopian va boshqalar [32] havo kanalida g'ovak muhitli ikki yo'lli havoli PVT tizim ustida ishlashgan. Modifikatsiyalashgan tizimning issiqlik FIK qiymati oddiy havoli PVT tizim bilan taqqoslanganda 10% ga yuqori bo'lgan. Gibril havoli PVT tizim sohasida ko'p sonli tadqiqotlar o'tkazilgan bo'lsada, biroq tizimning issiqlik va elektrik FIK qiymatlarini yanada oshirishga talab ortmoqda. Yuqoridagi adabiyotlar tahlilida keltirilgan ma'lumotlarga asosan maksimal issiqlik FIK qiymati 87% ni tashkil etsada, FEPdan havo yordamida olingan issiqlik energiyasi miqdori havoning issiqlik sig'imini pastligi hisobiga chegaralangan. Ma'lumki, PVT tizimdan olingan issiqlik energiyasi past potentsiilli energiya hisoblanadi. Aynan ushbu maqsadlar uchun past potentsiilli issiqlik energiyasini yuqori potentsiilli elektr energiyasiga o'zgartirishda PVT tizimli termoelektrik (TE) moduldan foydalaniladi.

TE modulning ishlash prinsipi issiqlik energiyasini elektr energiyasiga o'zgartirish imkonini beradigan Seebeck va Peltier effektlari prinsipiga asoslangan [33]. Babu va Ponnambalamlar [34] termoelektrik generatorli (TEG) PVT tizimning unumdorligini ko'rib chiqishgan (7-rasm). Tadqiqotda TEGni integratsiya qilish usuli, joylashish hududi va TEGning xususiyatlarini PVTning unumdorligiga ta'siri batafsil ko'rib chiqilgan.



7-rasm. Termoelektrik generatorli PVT tizim

Dimri va boshqalar [35] PVT-TEG moduli ustida tadqiqotlar o'tkazishgan, bunda uchta turli FEPdan foydalanilgan: shaffof, yarim shaffof va alyuminiy asosli. Issiqlik modeli tizimning unumdorligi ANN modeli natijalari bilan taqqoslangan

va ikkita modul o'rtasida yaxshi moslik aniqlangan. Dimri va boshqalarning [36] keyingi tadqiqotida yarim shaffof PVT-TEG tizim uchun matematik tenglamalar ishlab chiqilgan. PVT-TEG tizimning unumdorligi PV-TEG tizim va yarim shaffof PVT tizim bilan taqqoslanganda PVT-TEG tizimning unumdorligi eng yuqori ekanligi aniqlangan. Vorobiev va boshqalar [37] PVT-TEG tizimning gibrid modelini ishlab chiqishgan bo'lib, bunda TEG FEP bilan integratsiya qilingan. Nazariy hisoblar asosida gibrid tizimning umumiy FIK qiymati 30% ekanligi aniqlangan. Alamri va boshqalar [38] PV-TE gibrid tizimni tabiiy va majburiy sovitishni tadqiqot qilishgan. Ushbu tajriba tadqiqotida foydalanilgan PV-TE modul uchun passiv sovitish tizimi aktiv sovitish tizimidan samarali bo'lgan, buning asosiy sababi aktiv sovitish tizimi ventilyatorining talab etgan quvvati FEM ishlab chiqargan quvvatdan yuqori bo'lgan. Meshram va Sawarkarlar [39] past konsentrlangan PVT kollektorlarini havoli sovitish uchun diffuzor oqimini tadqiqot qilishgan. Barcha tahlil qilingan geometriyalar ichida bitta bukilgan yon devorli va uchta plastina-defektorli geometriya eng yaxshi ekanligi aniqlangan. Plastina-defektorni diffuzorning kirish teshigiga yaqin joylashtirish taklif etilgan. Diffuzorning balandligi havo tezligini taqsimlanishiga salbiy ta'sir ko'rsatmagan. Defektorning shakli va devorni joylashuvi sezilarli ta'sir ko'rsatgan.

Benghanem va Almohammedilar [40] TE va PV modullarni kombinatsiyalashtirish samarasini tahlili qilish uchun ikkita tajriba o'tkazishgan. TE moslamasi PV modulidagi ortiqcha issiqlikni bartaraf etish uchun sovitgich sifatida ishlagan. PV modulning haroratini har bir gradus Selsiyga pasayishi uning samaradorligini 0,5% ga oshirgan. TE moslamasini qo'shishdagi qo'shimcha harajatlar PV tizimning umumiy narxini 6% ni tashkil etgan. Abdo va boshqalar [41] konsentratordagi PV va TE quyosh generatoridan iborat gibrid tizimning zamonaviy konstruksiyasining unumdorligini baholashgan. Gibrid tizim PVga mahkamlangan mikrokanalli radiator va PV-TEning sovuq qismini o'z ichiga oladi. Ikkala modulga ham Frenel linzalari yordamida quyosh nurlanishi kuchaytirilgan. Gibrid tizim yordamida 77°C harorat olingan, energiya samaradorlik $3,2 \text{ kVt}\cdot\text{soat}/\text{m}^2$ ni tashkil etgan va quyosh elementlarining samaradorligini oshirishga erishilgan. Fabbri va Greppilar [42] PV-TE yangi sovitish tizimini sonli modellashtirishgan. TE sovitgich yordamida sovitish quyosh elementlarini sovitishni osonlashtiradi. TE quyosh FEMlarini sovitadi, samaradorlikni oshiradi va tom uchun issiqlik-izolyatori vazifasini bajaradi. PV panel uchun (100x125 sm) elektrik quvvat 15% ga ortadi. Seebeck effekti quvvatni 61,2 dan 71,2 Vt gacha oshiradi. Yuqorida keltirilgan adabiyotlar tahlilidan ko'rinib turibdiki, PVT tizimidan keng foydalanish asosida olingan issiq havodan qo'shimcha foydalanish barqaror energetikani kelajakdagi rivoji uchun eng

samarali usullardan biri hisoblanadi. Demak, PVT tizimdan foydalanish o'z navbatida FEMning elektrik samaradorligini, shuningdek PVT tizimdan olingan issiq havodan isituvchi muhit sifatida foydalanish tizimning umumiy samaradorligi sezilarli oshiradi.

ADABIYOTLAR RO'YXATI:

1. Reji Kumar R., Samykano M., Pandey A.K., Kadirgama K., Tyagi V.V. Phase change materials and nano-enhanced phase change materials for thermal energy storage in photovoltaic thermal systems: A futuristic approach and its technical challenges. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 133, 110341 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110341>.
2. Nižetić S., Grubišić-Čabo F., Marinić-Kragić I., Papadopoulos A.M. Experimental and numerical investigation of a backside convective cooling mechanism on photovoltaic panels. *Energy*, 111, 2016. – p. 211-225.
3. Chow T.T. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. *Appl. Energy*. 87(2), 2010. – p. 365-379.
4. Chauhan A., Tyagi V.V., Anand S. Futuristic approach for thermal management in solar PV/thermal systems with possible applications. *Energy Convers. Manag.* 163, 2018. – p. 314-354.
5. Zilli B.M., Lenz A.M., de Souza S.N.M., Secco D., Nogueira C.E.C., Junior, O.H.A. Performance and effect of water-cooling on a micro generation system of photovoltaic solar energy in Paraná Brazil. *J. Clean. Prod.* 192, 2018. – p. 477-485.
6. Fikri M.A., et al. Recent progresses and challenges in cooling techniques of concentrated photovoltaic thermal system: A review with special treatment on phase change materials (PCMs) based cooling. *Sol Energy Mater. Sol Cells*. 241(5), 111739 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111739>.
7. Kern Jr. E.C., Russell M.C. Combined Photovoltaic and Thermal Hybrid Collector Systems. Massachusetts Institute of Technology, Lexington, 1978.
8. Lazzarin R. Heat pumps and solar energy: A review with some insights in the future. *Int. J. Refrig.* 116, 2020. – p. 146-160.
9. Bhargava A.K., Garg H.P., Agarwal R.K. Study of a hybrid solar system-solar air heater combined with solar cell. *Sol. Energy*, 31(5), 1991. – p. 471-479.
10. Bergene T., Lovvik O.M. Model calculations on a fat-plate solar heat collector with integrated solar cells. *Sol. Energy*, 55, 1995. –p. 453-462.
11. Werner W., Monika S.D. Solar heat worldwide. Global Market Development and Trends 2023 Detailed Market Figures 2022. AEE-Institute for Sustainable Technologies 8200 Gleisdorf, Austria. 2024.

12. Özakin A.N., Kaya F. Effect on the exergy of the PVT system of fins added to an air-cooled channel: A study on temperature and air velocity with ANSYS Fluent. *Sol. Energy*, 184, 2019. – p. 561-569.
13. Srimanickam B., Vijayalakshmi M.M., Natarajan E. Experimental study of Exergy Analysis on flat plate solar photovoltaic thermal (PV/T) hybrid system. *Appl. Mech. Mater.* 787, 2015. – p. 82-87.
14. Bahtiar B., Zohri M., Fudholi A. Experimental investigation of photovoltaic thermal solar air collector with exergy performance comparison. *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.* 19(2), 2020. – p. 652-658.
15. Ooshaksaraei P., Aghili K., Sopian K., Zulkifi R., Zaidi S.H. Steady state characterization of bifacial solar cells at different configurations of air-based photovoltaic thermal solar panels. *J. Renew. Sustain. Energy*. 6(3) (2014). <https://doi.org/10.1063/1.4885117>.
16. Mojumder J.C., Chong W.T., Ong H.C., Leong K.Y. Abdullah-Al-Mamoon. An experimental investigation on performance analysis of air type photovoltaic thermal collector system integrated with cooling fins design. *Energy Build.* 130, 2016. – p. 272-285.
17. Popovici C.G., Hudişteanu S.V., Mateescu T.D., Cherecheş N.C. Efficiency improvement of photovoltaic panels by using air cooled heat sinks. *Energy Procedia*, 85, 2015. – p. 425-432.
18. Jha P., Das B., Gupta R.: Energy and exergy analysis of photovoltaic thermal air collector under climatic condition of North Eastern India. *Energy Procedia*. 158, 2019. – p. 1161-1167.
19. Singh S., Agrawal S., Avasthi D.V. Design, modeling and performance analysis of dual channel semitransparent photovoltaic thermal hybrid module in the cold environment. *Energy Convers. Manag.* 114, 2016. – p. 241-250.
20. Agarwal S., Tiwari G.N., Pandey H.D. Indoor experimental analysis of glazed hybrid PVT tiles air collector connected in series. *Energy Build.* 53, 2012. – p. 145-151.
21. Amori K.E., Abd-Al Raheem M.A. Field study of various air based PVT hybrid solar collectors. *Renew. Energy*, 63, 2014. – p. 402-414.
22. Slimani M.E.A., Amirat M., Kurucz I., Bahria S., Hamidat A., Chouch W.B. A detailed thermal-electrical model of three photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid air collectors and photovoltaic module: comparative study under Algiers climate condition. *Energy Convers. Manag.* 133, 2017. – p. 458-476.
23. Sopian K., Yigit K.S., Liu H.T., Kakac S., Veziroglu T.N. Performance analysis of photovoltaic–thermal air heaters. *Energy Convers. Manag.*, 11, 1996. – p. 1657-1670.

24. Tonui J.K., Tripanagnostopoulos Y. Performance improvement of PV/T solar collectors with natural air flow operation. *Sol. Energy*, 82(1), 2008. – p. 1-12.
25. Kumar R., Rosen M.A. Performance of a double pass PV/T solar air heater with and without fins. *Appl. Therm. Eng.* 31, 2011. – p. 1402-1410.
26. Jin G.L., Ibrahim A., Chean Y.K., Daghigh R., Ruslan H., Mat S., Othman M.Y., Ibrahim K., Zaharim A., Sopian K. Evaluation of single-pass photovoltaic-thermal air collector with rectangle tunnel absorber. *Am. J. Appl. Sci.* 7, 2010. – p. 277-282.
27. Hussain F., Othman M.Y., Yatim B., Ruslan H., Sopian K., Anuar Z., Khairuddin S. Comparison study of air base photovoltaic/thermal (PV/T) collector with different design of heat exchanger. *WREF* 1, 2012. – p. 189-194.
28. Othman M.Y., Ruslan H., Sopian K., Jin G.L. Performance study of photovoltaic-thermal (PV/T) solar collector with ∇ -grooved absorber plate. *Sains Malays.* 38, 2009. – p. 537-541.
29. Ahmed O.K., Mohammed J.A. Influence of porous media on the performance of hybrid PV/thermal collector. *Renew. Energy* 112, 2017. – p. 378-387.
30. Prashant D., Thakur N.S., Anoop K., Satyender S. An analytical model to predict the thermal performance of a novel parallel flow packed bed solar air heater. *Appl. Energy* 6, 2011. – p. 2157-2167.
31. Yousef B.A.A., Adam N.M. Performance analysis for flat plate collector with and without porous media. *J. Energy S. Afr.* 19 (4), 2008. – p. 32-42.
32. Sopian K., Alghoul M.A., Alfegi E.M., Sulaiman M.Y., Musa E.A. Evaluation of thermal efficiency of double-pass solar collector with porous-non porous media. *Renew. Energy* 34, 2009. – p. 640-645.
33. Lon E.B. Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems. *Science*, 321 (80), 2008. – p. 1457-1461.
34. Babu C., Ponnambalam P. The role of thermoelectric generators in the hybrid PV/T systems: a review. *Energy Convers. Manag.* 151, 2017. – p. 368-385.
35. Dimri N., Tiwari A., Tiwari G.N. Comparative study of photovoltaic-thermal (PVT) integrated thermoelectric cooler (TEC) fluid collectors. *Renew. Energy* 134, 343, 2018.
36. Dimri N., Tiwari A., Tiwari G.N. Thermal modelling of semitransparent photovoltaic-thermal (PVT) with thermoelectric cooler (TEC) collector. *Energy Convers. Manag.* 146, 2017. – p. 68-77.
37. Vorobiev Y., González-Hernández J., Vorobiev P., Bulat L. Thermal-photovoltaic solar hybrid system for efficient solar energy conversion. *Sol. Energy* 80, 2006. – p. 170-176.

38. Alamri S.G., Alamri T., Almutairi S., Akbar M. Evaluating forced versus natural convection for solar concentrating hybrid photovoltaic-thermoelectric power systems made from small up-cycled satellite dishes. In: The ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE) 5 (2018). <https://doi.org/10.1115/IMECE2017-70839>.
39. Meshram R., Sawarkar P.D. CFD Analysis in the Design of Diffuser for Air Cooling of Low Concentrated Photovoltaic/Thermal (LCPV/T) Solar Collector. Lect. Notes Mech. Eng., Springer, Singapore, 2020. – p. 191-198.
40. Benghanem M., Almohammed A. Performance of solar cells using thermoelectric module in hot sites, a practical guide for advanced methods in solar photovoltaic systems. Adv. Struct. Mater. 128, 2020. – p. 29-46.
41. Abdo A., Ookawara S., Ahmed M. Performance evaluation of a new design of concentrator photovoltaic and solar thermoelectric generator hybrid system. Energy Convers. Manag. 195, 2019. – p. 1382-1401.
42. Fabbri G., Greppi M. Numerical modeling of a new integrated PV-TE cooling system and support. Results Eng. 11, 100240 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100240>.