

Pasivne kuće

Čule, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:443123>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Ivan Čule

Pasivne kuće

Završni rad

Rijeka, rujan 2022.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Sveučilišni preddiplomski studij Građevinarstvo
Zaštita okoliša**

**Ivan Čule
JMBAG: 0114031125**

Pasivne kuće

Završni rad

Rijeka, rujan 2022.

IZJAVA

Završni rad izradio sam samostalno, u suradnji s mentoricom te uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

Ivan Čule

U Rijeci, 15. rujna, 2022.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorici Sanji Dugonjić Jovančević na pruženoj pomoći pri izradi rada.
Također se zahvaljujem na pruženoj potpori od obitelji i prijatelja.

SAŽETAK

U radu je prikazan osnovni koncept pasivnih kuća. U početnom dijelu rada objašnjen je razlog nastanka pasivnih kuća zajedno s osnovnim zahtjevima i značajkama. Pod značajkama je opisana toplinska izolacija, građevinski otvori, ventilacija i uloga obnovljivih izvora energije. U drugom dijelu rada prikazani su određeni koraci kojim bi se smanjila potrošnja energije prilikom životnog ciklusa zgrade. Objašnjena je prednost modularne gradnje, utjecaj geometrijskog oblika, utjecaj krajolika i sunčevih zraka, značaj pri odabiru materijala i važnost pravilne ventilacije. Također je prikazana prilagodba pasivnih kuća u drugim klimatskim zonama.

Ključne riječi: pasivna kuća, ušteda energije, toplinska izolacija, rekuperator, obnovljivi izvori, faktor oblika

SUMMARY

This paper presents the basic concept of passive houses. In the initial part of the work, the reason for the creation of passive houses is explained along with the basic requirements and features. Thermal insulation, building openings, ventilation and the role of renewable energy sources are described. In the second part of the paper, certain initiatives are presented that would reduce energy consumption during the life cycle of the building. The advantage of modular construction, the influence of geometric shape, the influence of the landscape and sun's rays, the importance of choosing materials and the importance of proper ventilation are explained. Adaptation of passive houses in other climate zones is also presented.

Key words: passive house, energy saving, thermal insulation, recuperator, renewable sources, form factor

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	2
POPIS TABLICA.....	3
POPIS KRATICA	4
POPIS OZNAKA	5
1. UVOD.....	6
2. NAČIN FUNKCIONIRANJA PASIVNE KUĆE.....	7
2.1. Principi.....	7
2.2. Toplinska izolacija.....	8
2.3. Građevinski otvori	9
2.4. Uloga obnovljivih izvora energije kod pasivnih kuća	10
2.4.1. Rekuperator - ventilacijski sustav.....	11
2.4.2. Toplinska pumpa - zemljani kolektor	13
2.4.3. Sunčevi kolektori	14
3. ZAHTJEVI ZA PASIVNE KUĆE	15
3.1. Kriteriji.....	15
3.2. Certifikati	15
3.3. Klasifikacija pasivnih kuća	17
4. DANAŠNJA GRADNJA PASIVNIH KUĆA	19
4.1. Važnost oblika	21
4.2. Utjecaj orijentacije i krajolika	23
4.3. Utjecaj i upotreba sunčevih zraka	25
4.4. Značaj materijala	27
4.4.1. Usporedba drva i armiranog betona	30
4.5. Kvaliteta zraka	33
4.6. Modularna gradnja.....	35
5. RAZLIKE IZMEĐU PASIVNIH KUĆA U DRUGIM KLIMATSKIM ZONAMA	37
6. PREDNOSTI I NEDOSTACI PASIVNIH KUĆA	40
7. ZAKLJUČAK.....	42
LITERATURA.....	43

POPIS SLIKA

Slika 1. Ilustrativni prikaz pasivne kuće (prema [2])	7
Slika 2. Termografski snimak toplinskog zračenja [6].....	9
Slika 3. Utjecaj plemenitog plina i premaza na temperaturu stakla [8].....	10
Slika 4. Shematski prikaz cirkuliranja zraka sa primjenom dizalica topline [6]	11
Slika 5. Shematski prikaz cirkuliranja zraka sa primjenom rekuperatora [10]	12
Slika 6. Osnovni dijelovi rekuperatora [10]	12
Slika 7. Horizontalni zemljani kolektor [9].....	13
Slika 8. Shematski prikaz cirkuliranja zraka sa solarnim izmjenjivačem topline (prema [12])	14
Slika 9. Prikaz certificiranih pasivnih kuća na globalnoj razini [15]	16
Slika 10. Klasifikacija pasivnih kuća prema Njemačkom institutu za pasivne kuće [16].....	17
Slika 11. Uuthuuske – kuća u nizu otporna na životni vijek (postavljanje i gotov proizvod) [17] ..	20
Slika 12. Uuthuuske – kuća u nizu otporna na životni vijek (model) [17].....	20
Slika 13. MOOS– višetažne stambene zgrade [17]	21
Slika 14. Stilovi gradnje i njihov faktor oblika [20].....	23
Slika 15. Postavljanje drveća (prema [21])	24
Slika 16. Okvirno vrijeme suncostaja i kut sunčevih zraka (prema [22])	25
Slika 17. Španjolski model - Farnsworth House [23]	26
Slika 18. Gradnja opečnog zida sa toplinskom izolacijom [24].....	28
Slika 19. Blok od polistirena [24]	28
Slika 20. Toplinska provodljivost laganih zidnih konstrukcija [24]	29
Slika 21. Tlocrt i 3D prikaz drvene pasivne zgrade u Čileu [25].....	30
Slika 22. Faze izgradnje drvene i AB zgrade u Čileu [25].....	31
Slika 23. Utjecaj drvene i AB zgrade na emisije ugljika (prema [25])	32
Slika 24. Utjecaj drvene i AB zgrade na potrošnju energije (prema [25]).....	33
Slika 25. Tlocrt kuće sa ventilacijskim sustavom i uređajima za mjerenje zraka [26].....	34
Slika 26. Čelični profili za izradu modularnih okvira [28]	36
Slika 27. Tlocrti reprezentativnih zgrada za određivanje klimatskih zona za pasivne kuće [29].....	37
Slika 28. Podjela klimatskih zona u Kini [30] i predložena podjela projektiranja pasivnih kuća [29]	38

POPIS TABLICA

Tablica 1. Klasifikacija i karakteristike energetske učinkovitih kuća [13]	18
Tablica 2: Geometrijska tijela i njihov faktor oblika za volumen od 400 m ³ [19]	22
Tablica 3: Prednosti i nedostaci pasivne kuće.....	41

POPIS KRATICA

G vrijednost stakla - koeficijent koji pokazuje odnos između ukupne količine energije koja je prošla kroz staklo i ukupne količine energije koja je došla na staklo

PHPP - The Passive House Planning Package

PHIUS+ - Passive House Institute US

HERS - Home Energy Rating Standard

CO₂ - ugljikov dioksid

SC - jako hladna klimatska regija

C - hladna klimatska regija

HSCW - klimatska regija sa vrućim ljetima i hladnim zimama

M - topla klimatska regija

WU - koeficijent prolaza topline vanjskog zida

BCU - koeficijent prolaza topline kroz strop

SHGC - koeficijent dobivanja sunčeve topline

UG - vrijednost G stakla

HERE - povrat toplinske učinkovitosti

HURE - učinkovitost povrata vlage

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
U	W/m^2K	koeficijent prolaska topline
n50	h^{-1}	razlika tlakova između vanjskog i unutarnjeg zraka od 50 Pa
E	kWh/m^2a	energetski broj za godišnju potrošnju električne energije
O	m^2	oplošje
V	m^3	volumen
fs	m^{-1}	faktor oblika

1. UVOD

Nakon udara prve naftne krize 1973. te sljedeće koja je nastupila 1979. godine počele su se poduzimati mjere o smanjenju ovisnosti o fosilnoj energiji. Zamjenjivala se nafta s alternativnim gorivom, poticala se proizvodnja automobila manje potrošnje, uvodilo se zimsko i ljetno računanje vremena radi boljeg korištenje dnevnog svjetla te je nastupio viši standard građenja.

Pasivna kuća je građevinski standard koji je energetske učinkovit, pristupačan, udoban i ekološko osviješten u isto vrijeme. Postiže se energetska učinkovitost prvenstveno kroz nepropusnu ovojnicu zgrade koju čine krov, zidovi i prozori. Pasivna kuća predstavlja koncept gradnje koji svatko može primijeniti. Prepoznatljiva je po malom utrošku energije za grijanje i hlađenje prostorija. Postiže se do 90% uštede u usporedbi s tradicionalnom izgradnjom, te više od 75% s prosječnom novogradnjom. Zbog uštede energije smanjuju se i staklenički plinovi. Kod izgradnje pasivnih kuća cijena je veća, ali zbog dugoročnih ušteda, pasivne kuće su dobra investicija.

Koncepti prvih pasivnih kuća nastao je u Sjedinjenim Američkim Državama i Kanadi. Dizajnirali su Lo-Cal koja je trošila 60% manje energije od učinkovitih zgrada tog razdoblja. Kasnih 1980-ih u Njemačkoj je osnovan Passivhaus Institute i stvoren Passivhaus standard performans koji se i dan danas smatra najstrožim standardom energetske učinkovitosti. U narednim godinama razvijani su modificirani principi pasivnih kuća te je 2015. godine stvoren standard koji uzima u obzir one građevine koje su građene u nepovoljnim klimatskim zonama.

U ovom radu će se prikazati funkcioniranje, osnovne karakteristike i važnost pasivnih kuća u današnjici te objasniti zašto mogu biti važan dio gradnje u budućnosti.

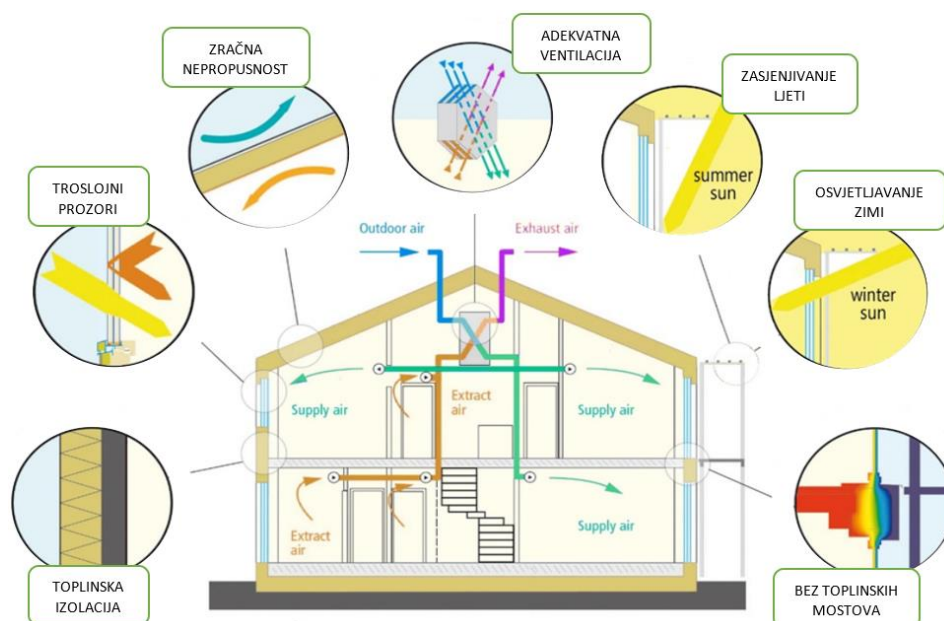
2. NAČIN FUNKCIONIRANJA PASIVNE KUĆE

2.1. Principi

Pasivna kuća funkcionira na 5 osnovnih principa koji osiguravaju minimalnu potrošnju energije, stabilnu temperaturu, kvalitetan zrak u zatvorenom prostoru uz smanjenje buke [1]:

- nema toplinskih mostova – cijeli objekt mora biti dobro izoliran bez praznina kako bi smanjili potrebu za grijanjem i hlađenjem za postizanje ugodne temperature
- visokokvalitetna izolacija – služi za smanjenu razmjenu topline s okolišem, najčešće se koristi kamena vuna, ali tu su i drugi izolacijski materijali kao na primjer ekspanzirani polistiren (stiropor)
- najčešće se koriste troslojni prozori s niskom vrijednošću G stakla radi boljeg propuštanja sunčeve energije zimi, a bolja zaštita od prevelikih toplina ljeti
- konstrukcija mora biti nepropusna, kroz nju ne smije biti nekontroliranog strujanja unutarnjeg i vanjskog zraka
- mehanička ventilacija s povratom topline – rekuperator

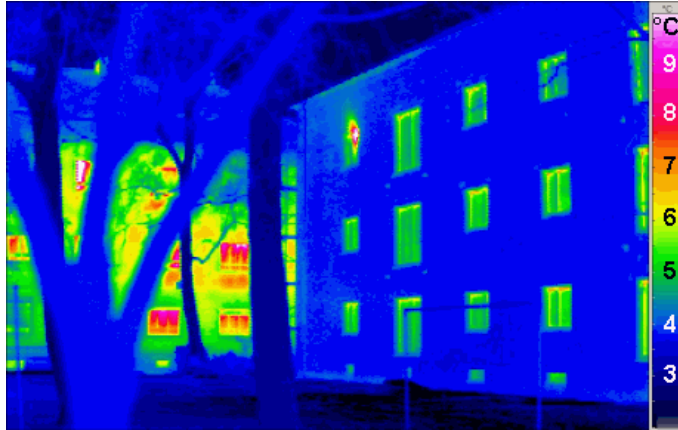
Slika 1. pokazuje osnovne značajke pasivne kuće.



Slika 1. Ilustrativni prikaz pasivne kuće (prema [2])

2.2. Toplinska izolacija

Kod gradnje pasivnih kuća veliki problem predstavlja adekvatna ugradnja toplinske izolacije. Pravilnim postavljanjem doprinosimo dizajnu objekta bez toplinskih mostova. Toplinski most je manje područje u omotaču u kojem je toplinski tok povećan radi promjene geometrije, debljine i/ili materijala, definira se na način da su doprinosi zanemarivo mali ili su jednaki nuli. U novim zgradama često se može postići s par jednostavnih detalja bez velikih troškova no to se treba uzeti u obzir tokom planiranja. Kod starijih zgrada nakon dodataka komponenta pasivne kuće i dalje ostaju značajni toplinski mostovi. Pažljivo planiranje smanjenja toplinskih mostova može biti ključno za postizanje standarda pasivne kuće [3]. U današnje vrijeme prilikom gradnje temelja sve češće se upotrebljava temeljna ploča jer rješava sve toplinske mostove ispod zgrade i sa strane temelja. Kod takvog načina postavljanja temelja toplinska izolacija se nalazi ispod temeljne ploče. Takav model rada koji sprječava toplinske mostove obavezno se upotrebljava kod gradnje pasivnih kuća. Pri ugradnji toplinske izolacije najbitnije je postići što manji koeficijent toplinske provodljivosti. Pokazuje se da je koeficijent idealan s vrijednošću koeficijenta prolaska topline $U \cong 0.11 \text{ W/m}^2\text{K}$. Postizanje manjih vrijednosti nema većeg efekta. Termodinamičke vrijednosti moraju biti iste po cijeloj strukturi objekta zbog sprječavanja kondenzacije koja se pojavljuje zbog razlike temperatura na dijelovima konstrukcije kod drugih vrsta gradnje (upotreba različitih materijala, različita gustoća i termodinamička svojstva). Ytong konstrukcija zbog svojih karakteristika poput težine, brze ugradnje, izuzetnih izolacijskih svojstava i statičke čvrstoće je odlično rješenje za stropnu konstrukciju [4]. Konstrukcija mora biti izolirana tako da ukupni koeficijent prolaza topline bude manji od $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ gdje je za vanjski zid $U \leq 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$, za krov i pod u tlu $U \leq 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$. U praksi te vrijednosti dobivamo raznim debljinama toplinske izolacije, za vanjski zid 20-30 cm, kosi krov 35-40 cm, a za podove u tlu 14-20 cm [5]. Na slici 2. prikazan je termografski snimak toplinskog zračenja pasivne (desni objekt) i obične zgrade (lijevi objekt). Najviše toplinskog zračenja prolazi kroz građevinske otvori gdje obična zgrada zrači u prosjeku sa $8 \text{ }^\circ\text{C}$, dok pasivna sa $5 \text{ }^\circ\text{C}$. Zidovi obične zgrade zrače u prosjeku sa $6 \text{ }^\circ\text{C}$, dok pasivna sa $4 \text{ }^\circ\text{C}$ [6].



Slika 2. Termografski snimak toplinskog zračenja [6]

2.3. Građevinski otvori

Građevinski otvori poput prozora i vrata su neophodni dio građevinske konstrukcije kako bi objekt mogao pravilno funkcionirati. Njihove karakteristike poput veličine, položaja, načina ugradnje i konstrukcije imaju jako bitan utjecaj na zgradu. Prozori pasivnih kuća bi trebali biti sa trostrukim ostakljenjem, premazom niske emisivnosti i punjeni plemenitim plinovima sa ukupnim koeficijentom prolaza topline manjim od $0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$. Upotreba prozora s klasičnim roletnim kutijama nije primjerena. U pažljivo projektiranoj i izvedenoj pasivnoj kući tijekom sezone grijanja prozori unesu više energije nego što izgube stoga prozori spadaju u pozitivne stavke. Vrata moraju imat dobar koeficijent prijelaza topline i biti dobro zabrtvljena. Problem kod pasivnih kuća je što se s otvorima gubi jako puno energije, čak i najbolji prozori na svijetu imaju 6 do 7 puta veće transmisijske gubitke energije od zidova [4]. Kako bi došli do najmanjih mogućih gubitaka trebamo smanjiti prijenos topline koji se 50% prenosi zračenjem te otprilike po 25% kondukcijom i konvekcijom. Dodavanjem staklu premaza niske emisivnosti gubici topline zračenjem se mogu smanjiti do čak 98%. U proizvodnji se mogu mijenjati udijeli nanesenih materijala kako bi se staklo proizvodilo za točno određena klimatska područja. Zamjenom zraka toplinske provodljivosti od $0,026 \text{ W/m}^2\text{K}$, sa plemenitim plinovima poput argona ($U=0,018 \text{ W/m}^2\text{K}$) i kriptonu ($U=0,009 \text{ W/m}^2\text{K}$) između stakala smanjujemo prijenos topline kondukcijom i konvekcijom. Stoga se dolazi do zaključka da se najbolji rezultati postižu kombiniranjem plemenitog plina s modernim staklima s premazima. Između ostalog plemeniti plin poboljšava svojstva zvučne

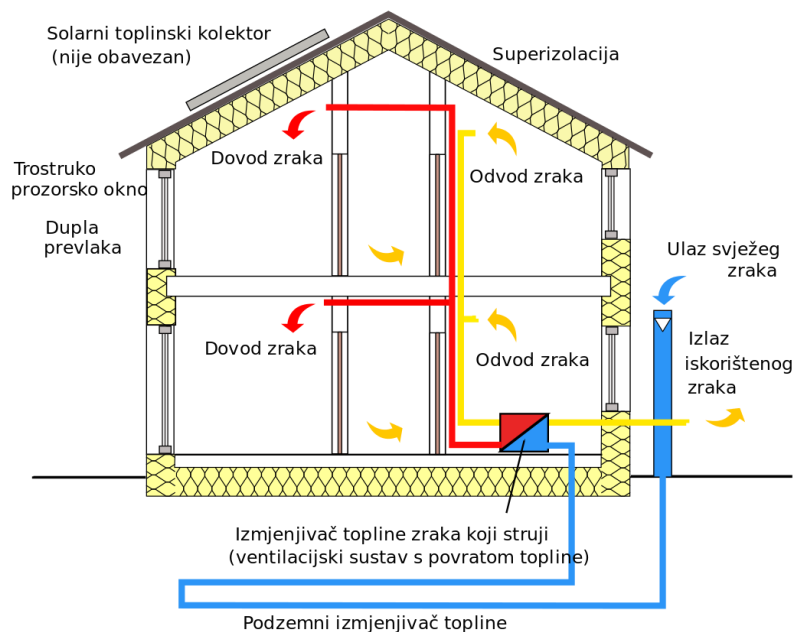
izolacije i smanjuje mogućnost unutarnje kondenzacije. Kako bi ispravno djelovao njegova koncentracija mora biti veća od 85%, očekivani gubitak plina je 1% godišnje [7]. Slika 3. prikazuje različit utjecaj topline pri odabiru stakla s različitim brojem staklenih površina te njenom unutarnjom ispunom i premazom [8].



Slika 3. Utjecaj plemenitog plina i premaza na temperaturu stakla [8]

2.4. Uloga obnovljivih izvora energije kod pasivnih kuća

Pasivna kuća koristi energiju iz obnovljivih izvora pomoću dizalica topline. Toplinske pumpe ili dizalice topline su termo-tehnički uređaji koji koriste obnovljive izvore iz prirode kako bi toplinu iz sustava niže temperaturne razine prenijeli u sustav više. Energija se može dobivati iz tla, zraka i vode pa razlikujemo dizalice topline tlo-voda, voda-voda, zrak-voda. Za pasivne i niskoenergetske kuće uz rekuperator najčešće se koriste dizalice topline tlo-voda. Postoji mogućnost korištenja solarnih toplinskih kolektora, ali on nije nužan kako bi ostvarili kriterij za pasivnu kuću već se koristi za pasivnu kuću Plus i Premium [9]. Na slici 4. je prikazana pasivna kuća sa primjenom dizalica topline [6].

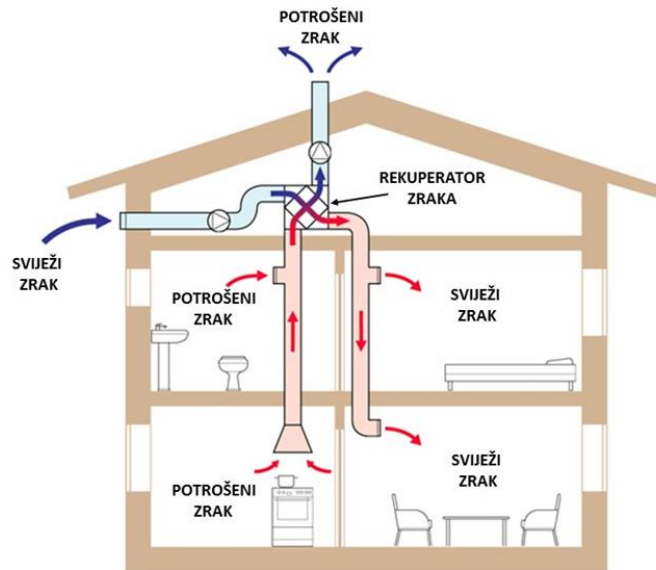


Slika 4. Shematski prikaz cirkuliranja zraka sa primjenom dizalica topline [6]

2.4.1. Rekuperator - ventilacijski sustav

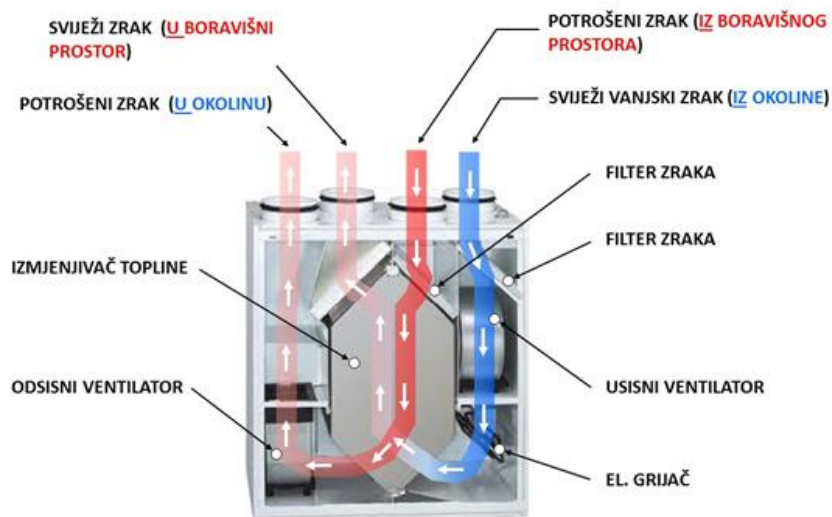
Boravak na duže vrijeme u zatvorenom prostoru dovodi do onečišćenja zraka. Onečišćene čestice su prisutne u većoj koncentraciji nego u vanjskom okolišu. Zbog toga nam je potrebna ventilacija zraka kako bi odveli onečišćeni zrak. Standard pasivne kuće zahtijeva zrakonepropusnu ovojnicu zgrade kako bi smanjili ventilacijske gubitke i uštedili energiju. Zbog spriječenosti dovodjenja svježeg zraka potreban nam je ventilacijski sustav koji bi dovodio novi/svježi zrak, a da pritom trošimo manju količinu energije za grijanje i hlađenje prostora.

Rekuperacija zraka je proces povrata topline u zgradu na način da zamjenjujemo onečišćeni unutarnji zrak sa svježim vanjskim zrakom, a da se pritom ta dva zraka ne miješaju. Zimi potrošeni sobni zrak prolazi kroz rekuperator i zagrijava hladni vanjski zrak pa svježi zrak dolazi dogrijan u boravišni prostor. Ljeti potrošeni klimatizirani zrak prolazi kroz rekuperator i hladi vanjski topli zrak. Rekuperator pridonosi smanjenju energije potrebnu za grijanje prostora zimi i hlađenje prostora ljeti. Sustav se sastoji od rekuperatora, kanala za zrak, prigušivača buke, razdjelnika i sabirnika zraka, stropne/zidne zračne kutije i sobni zračni ventili, vanjske rešetke za usis i odsis zraka te regulacije sustava. Na slici 5. je prikazana pasivna kuća sa primjenom rekuperatora [10].



Slika 5. Shematski prikaz cirkuliranja zraka sa primjenom rekuperatora [10]

Rekuperator je najvažniji dio sustava, njegova efikasnost rekuperacije je između 65% - 90%. Najvažniji dio je izmjenjivač topline koji je najčešće izgrađen od celuloze, polimera ili aluminijske. Na usisnoj strani vanjskog zraka i usisnoj strani unutarnjeg zraka ugrađeni su filteri koji se moraju mijenjati dva do tri puta godišnje. Na slici 6. je prikazan prolaz zraka kroz rekuperator i njegovi osnovni dijelovi [10].

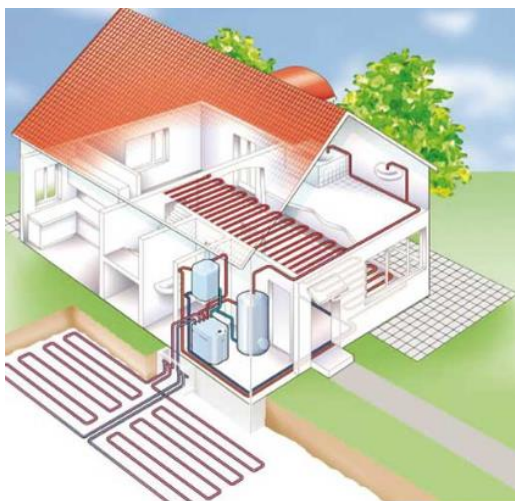


Slika 6. Osnovni dijelovi rekuperatora [10]

Kanalski razvod se najčešće izvodi od polimernih fleksibilnih okruglih cijevi, polimernih ovalnih cijevi ili pocinčanih cijevi. Cijevni razvod se izvodi do svake boravišne prostorije u kojoj se boravi i dijeli se na tlačni cjevovod i odsisni cjevovod. Tlačni cjevovod dovodi svježi zrak u dnevni boravak, spavaće sobe, blagovaone i radne sobe. Odsisni cjevovod odvodi onečišćeni zrak iz kupaonica, kuhinja, vešeraja i ostava. Time osiguravamo cirkulaciju, a i ujedno odvodimo neugodne mirise. Zrak se može dovoditi u nekoliko brzina, a u pravilu rekuperator konstantno radi i dobavlja svježi zrak [10].

2.4.2. Toplinska pumpa - zemljani kolektor

Zemlja posjeduje konstantnu temperaturu kroz godinu u rasponu 7°C do 13°C na dubini 2 metra. Plastične cijevi od polietilena koja imaju dobra toplinska i fizikalna svojstva se polaže na dubinu od 1.2 do 1.5 metara. Cijevi se trebaju izvoditi u sekcijama približnih dužina radi podjednakih protočnih uvjeta. Svaka zasebna sekcija ne smije biti duža od 100 metara zbog opasnosti od prevelikog pada tlaka. Slika 7. nam prikazuje primjer pasivne kuće izvedene sa horizontalnim zemljanim kolektorom [9].



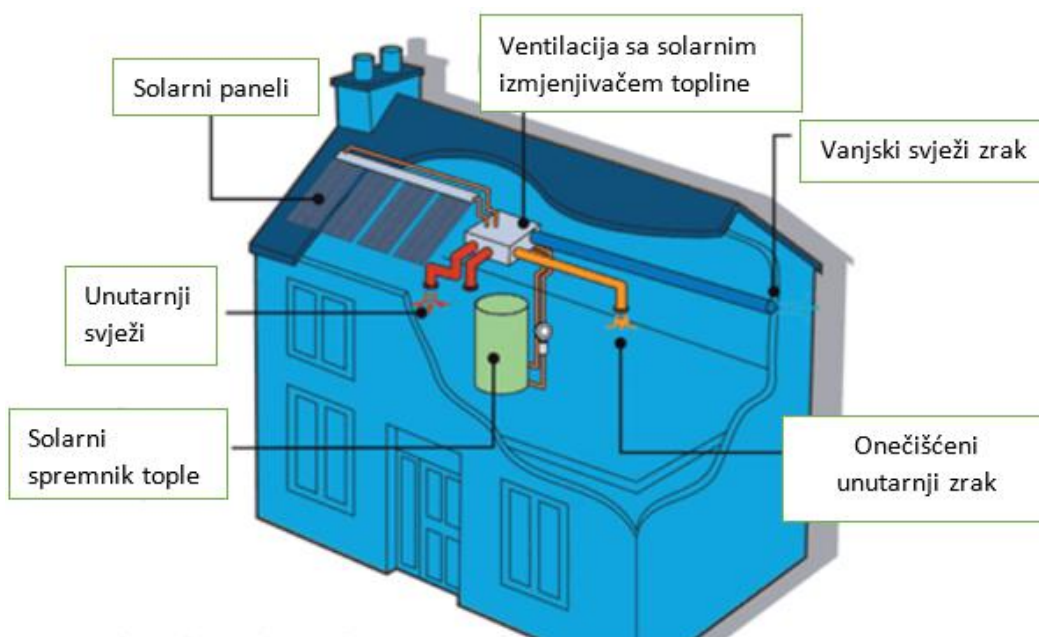
Slika 7. Horizontalni zemljani kolektor [9]

Kod dimenzioniranja pažnju trebamo obratiti na raspoloživost tla, sastav tla, raspoloživu površinu zemljišta, izvedbu kolektora, način rada sustava grijanja s dizalicom topline i dimenzije cijevi [9].

2.4.3 Sunčevi kolektori

Zadnjih nekoliko godina sve više se počela iskorištavati solarna energija koju možemo dobivati dodavanjem sunčevih kolektora. Dobivenu energiju možemo koristiti za grijanje tople vode i stambenog prostora. Solarni paneli se najčešće postavljaju na krov s nagibom prema jugu, no znaju se postavljati i na južnoj fasadi okomito na tlo.

Razlikujemo nekoliko vrsta solarnih kolektora, ali najčešće se upotrebljavaju pločasti kolektori zbog optimalnog omjera dobiveno-uloženo. Imaju vrlo visok koeficijent apsorpcije sunčevog zračenja što rezultira visokim stupnjem iskoristivosti. Za bolju apsorpciju koristi se tinox premaz. Mogu se ugrađivati na kose i ravne krovove s podkonstrukcijom. Gledano kroz godišnji prosjek, najviše solarne energije možemo dobiti ako je nagib kolektora u odnosu na horizontalnu površinu jednak kutu zemljopisne širine mjesta, Hrvatska širina iznosi 40° do 45° . Tražimo li u zimskim mjesecima više solarne energije postaviti ćemo nagib kolektora pod kutem 50° do 60° , a za više energije u ljetnim mjesecima ćemo koristiti manje kuteve 25° do 35° [11]. Slika 8. nam pokazuje pojačanu ventilaciju sa solarnom energijom. Dobivena energija iz solarnih panela se skuplja u spremniku te se koristi prilikom rekuperacije zraka [12].



Slika 8. Shematski prikaz cirkuliranja zraka sa solarnim izmjenjivačem topline (prema [12])

3. ZAHTJEVI ZA PASIVNE KUĆE

3.1. Kriteriji

Obvezni kriteriji pasivne kuće prema Senegačnik su [13]:

- koeficijent prolaska topline kroz zidove mora biti manji od $0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$
- prozori i vrata (troslojna stakla uključujući i okno prozora) ne smije prekoračiti vrijednost koeficijenta prolaska topline od $0,80 \text{ W/m}^2\text{K}$
- izvedba bez toplinskih mostova ($\psi \leq 0,01 \text{ W/m}^2\text{K}$)
- pri razlici tlakova od 50 Pa broj izmjena zraka u prostoru ne smije prijeći vrijednost od $0,6 \text{ h}^{-1}$ ($n_{50} < 0,6 \text{ h}^{-1}$)
- potrošnja električne energije za pogon rekuperatora $\leq 0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ prepumpanoga zraka
- minimalne toplinske gubitke pri pripremi i distribuciji sanitarne vode
- upotreba učinkovitih kućanskih aparata [A, A+]

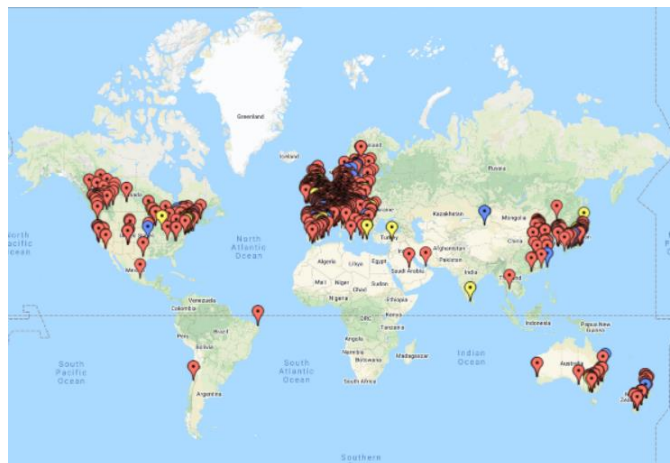
3.2. Certifikati

Putem certificiranja pasivne kuće možemo biti sigurni da su postignuti svi potrebni zahtjevi kvalitete standarda. Standard pasivne kuće nije zakonska obaveza već ovisi isključivo o investitoru. Certificiranje se provodi za stambene zgrade, nestambene zgrade i sanacije do standarda pasivne kuće. Certificirati se mogu i građevinske komponente koje se ne moraju primjenjivati u izgradnji pasivnih kuća, ali njihovim korištenjem se uveliko pojednostavljuje planiranje. U najpoznatije ustanove za certificiranje pasivnih kuća uvrštavaju se Passivhaus Institut iz Njemačke, Passive House Institut US iz SAD-a, Passive House Trust iz Velike Britanije. Za niskoenergetske kuće u Njemačkoj, Švicarskoj, Lihtenštajnu i Japanu su u velikom broju rasprostranjeni i Minergie certifikati. Pasivne i Minergie kuće su uvelike slične po svom načinu uštede energije, no glavna razlika u certificiranju je što Passive House certifikat se dobije na temelju izvedbe objekta dok se Minergie certifikat dobije po početnom dizajnu. Stoga Minergie certifikat ne mora uvijek značiti da je postignuta smanjena tražena potrošnja.

U Republici Hrvatskoj ne postoji pravovaljan sustav za certificiranje pasivnih kuća već se vodimo propisima Passivhaus Instituta iz Njemačke i SAD-a i zakonitim propisima Republike Hrvatske što podrazumijeva A+ kategoriju. Najstariji institut se nalazi u Njemačkoj i akreditira ustanove u cijelom svijetu za certificiranje. Zahtjevi za izdavanje certifikata se podnose nakon završetka gradnje. Certificiranim projektantom se smatra osoba koja je prošla program obuke i položila stručni ispit ili ima dokaz da je projektirala pasivnu kuću, dok se certificiranim izvođačem postaje prolaženjem programa obuke i ispita. Njihovom provedbom se bave ustanove koje je akreditirao Passivhaus Institut, certifikat se obnavlja svakih pet godina. Passive House Planning package (PHPP) je alat razvijen od strane njemačkog instituta za pasivne kuće te je priznat kao najbolji indikator ispravnosti projektnog rješenja pasivnih kuća i običnih u pogledu energetske obilježja [14].

Passive House Institut US primjenjuje certifikaciju pasivnih kuća po PHIUS+ modelu. Sastoji se od dva dijela, u prvom se certificira temeljeno na energijskom modelu zgrade za koji je potrebno priložiti nacрте, specifikacije i model zgrade. Drugi dio se bavi osiguranjem kvalitete za koju je potrebno izvršiti terensku kontrolu. Ispituje se energetska učinkovitost zgrade, ispituje ventilacija te zrakonepropusnost *blower door* testom. Također kao i u Njemačkom Institutu potrebno je imati certificirane ispitivače koje provjeravaju kvalitetu gradnje i izrađuje HERS (Home Energy Rating Standard) indeks. HERS indeks predstavlja mjeru energetske učinkovitosti zgrade u SAD-u. Raspon ljestvica je od 0-100 gdje 100 predstavlja potrošnju energije standardne američke kuće dok 0 predstavlja nultu potrošnju [14].

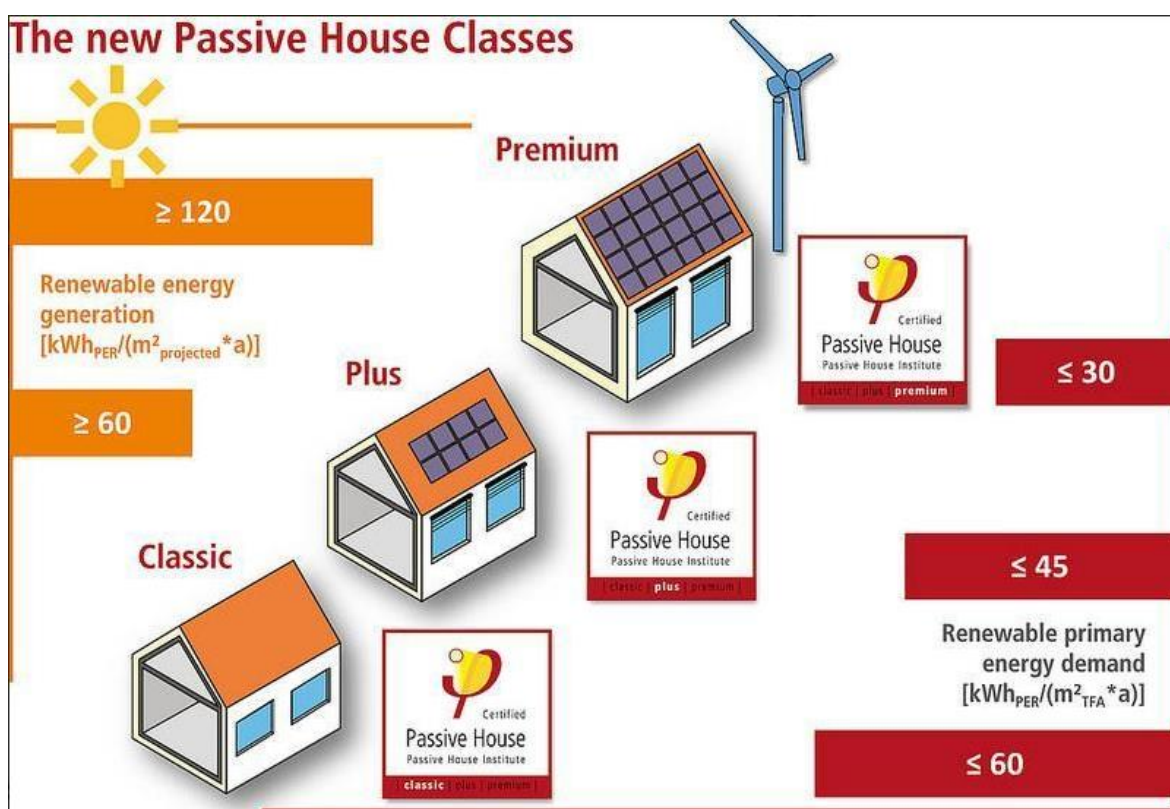
Slika 9. prikazuje certificirane objekte na karti svijeta. Može se primijetiti da Europa i SAD ima najveću brojku certificiranih građevina na svijetu [15].



Slika 9. Prikaz certificiranih pasivnih kuća na globalnoj razini [15]

3.3. Klasifikacija pasivnih kuća

Prema Passivhaus Institutu iz Njemačke definirane su tri vrste pasivnih kuća, a to su pasivna kuća Classic, Plus i Premium. Prva je klasificirana pasivna kuća Classic u kojoj energija za kućanske potrebe kao što su grijanje, topla voda i električna energija ne prelazi više od 60 kWh/m² stambenog prostora. Dodatne dvije kategorije koriste energiju iz obnovljivih izvora. Pasivna kuća Plus generira dodatnu energiju od sunca iz solarnog fotonaponskog sustava gdje se proizvede više energije nego što je potrebno. Njena potrošnja ne prelazi više od 45 kWh/m². Kod pasivne kuće Premium potrošnja ne prelazi 30 kWh/m² dok se uobičajeno proizvede oko 120 kWh/m². Slika 10. nam pokazuje klasifikaciju pasivnih kuća sa potrebnom potražnjom i proizvodnjom obnovljive energije [16].



Slika 10. Klasifikacija pasivnih kuća prema Njemačkom institutu za pasivne kuće [16]

Tablica 1. prikazuje kategorije energetsko učinkovitih kuća i njihove karakteristike. Najviše energije iz gradske mreže traži nisko-energetska kuća iz prve kategorije, dok plus-energetska kuća koja pripada šestoj kategoriji postiže višak energije koji daje u javnu gradsku mrežu.

Tablica 1. Klasifikacija i karakteristike energetske učinkovite kuće [13]

KATEGORIJA ENERGETSKI UČINKOVITIH KUĆA	KARAKTERISTIKE
1. Nisko-energetska kuća	Zgrada s godišnjom potrebnom toplinom za grijanje između 40-60 kWh/(m ² a), a najmanje 15 kWh/(m ² a). U nisko-energetskoj zgradi potreban je tradicionalni sustav grijanja i grijača tijela. Zrakonepropusnost je $n_{50} < 1,5 \text{ h}^{-1}$.
2. Trolitarska kuća	Trolitarska kuća je nisko-energetska kuća s godišnjom potrebnom toplinom za grijanje otprilike 30 kWh/(m ² a). Propisana zrakonepropusnost je $n_{50} < 1 \text{ h}^{-1}$. Konstrukcija mora biti bez toplinskih mostova. Potreban je tradicionalni sustav grijanja. U trolitarsku je kuću ugrađena bar jedna od sljedećih komponenti: sunčani uređaj za grijanje sanitarne vode i/ili uređaj za prozračivanje s vraćanjem topline iskorištenoga zraka.
3. Pasivna kuća	Pasivna kuća je energetske štedljiva zgrada kod koje je stambena ugodnost osigurana bez uobičajenih sustava grijanja ili uređaja za klimu. Godišnja potrebna toplina za grijanje zgrade može biti najviše 15 kWh/(m ² a) i to vrijedi u svim državama.
4. Nulta-energetska kuća	Zgrada koja u godišnjem prosjeku ukupnu upotrijebljenu energiju dobiva sama iz sunčeve energije, iako nije neovisna o javnoj energetske mreži. Zgrada nema tradicionalni sustav grijanja. Ljeti višak električne energije daje u javnu mrežu, a zimi rabi električnu energiju iz javne mreže.
5. Energetske samodostatna kuća	Zgrada koja svu potrebnu energiju dobiva iz sunčeve energije. Ona nije priključena na javnu energetske mrežu. Ljeti višak električne energije sprema za zimsko razdoblje.
6. Plus-energetske kuća	Zgrada koja odgovara energetske samodostatnoj kući. Dobivanje električne energije u sunčanim pretvornicima je veliko te postiže višak koji se daje u javnu električnu mrežu.

4. DANAŠNJA GRADNJA PASIVNIH KUĆA

Trenutno se najviše počela koristiti modularna gradnja. To je najsuvremenija metoda gradnje kuća niske energetske potrošnje, u kojoj se izgrađuju gotovi zidovi, podovi i stropovi u proizvodnom pogonu te sklapaju u module. Nakon toga, proizvedeni dijelovi se dovoze na gradilište i međusobno spajaju ako konstrukcija sadrži više modula. Zbog pogodnosti takve tvorničke proizvodnje riješen je nedostatak kvalificirane radne snage, bolja provjera kvalitete, brže i lakše građenje te manja strukturalna oštećenja. Pametnim slaganjem modula može se doći do bolje kompaktnosti što je uvelike pozitivno kod postizanja boljeg standarda pasivnih kuća [17].

U Nizozemskoj 2021. godine otvoren je natječaj u kojem su natjecatelji trebali osmisliti koncept stanovanja koji je pristupačan za jedno do dvije osobe s ciljem ekonomskog te ekološkog prihvatljivog sustava koji će doprinositi sadašnjosti i budućnosti. Fokus je bio na gradnji standardne kuće u nizu, kuće u nizu otporne na životni vijek i višekatnice stambene zgrade. Većina prijava je koristila tvornički proizvedene modularne jedinice te su sva tri pobjednika koristila tu vrstu gradnje s principom pasivne kuće. Moduli su kompaktni, traže smanjenu količinu energije, vrlo su dobro izolirani i imaju troslojno staklo. Prostorije su zonirane na način da se dobije najbolji energetsko učinkovit prostor. Koriste se materijali na bazi biologije ili reciklirani materijali kako bi se smanjio utjecaj na okoliš. Staklene površine su pametno orijentirane kako bi apsorbirale zimsko sunce te isključile vruće ljetno sunce. Slika 11. prikazuju donošenje modula na gradilište (gore desno) te njihovo spajanje (dole desno) i njihov gotov proizvod (lijeva strana). Na gornjoj lijevoj slici mogu se primijetiti solarni paneli. Uthuuske je model stanovanja koji je pobijedio na natječaju u Nizozemskoj u kategoriji gradnja kuće u nizu otpornu na životni vijek [17].



Slika 11. Uuthuske – kuća u nizu otporna na životni vijek (postavljanje i gotov proizvod) [17]

Slika 12. prikazuje razne mogućnosti slaganja modula [17].



Slika 12. Uuthuske – kuća u nizu otporna na životni vijek (model) [17]

Slika 13. prikazuje tlocrt i dva modela višetažnih stambenih zgrada dobivene drugačijim spajanjem modularnih predgotovljenih elemenata. MOOS je model stanovanja koji je pobijedio na natječaju u Nizozemskoj u kategoriji višetažne stambene zgrade [17].










Slika 13. MOOS– višetažne stambene zgrade [17]

4.1. Važnost oblika

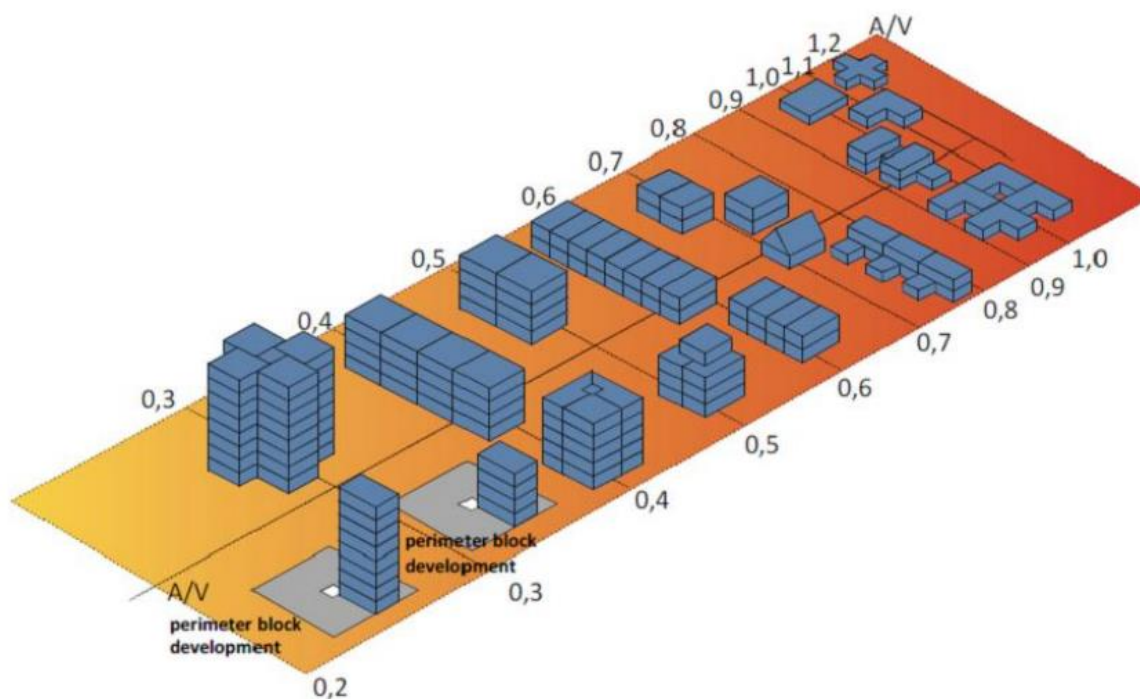
Oblik pasivne kuće značajno utječe na standard energetske učinkovitosti. Odabirom povoljnog geometrijskog oblika mogu se znatno smanjiti transmisijski gubici pri čemu dolazi do ukupne štednje energije. Iskazuje se pomoću faktora oblika f_s . Izračunava se omjer oplošja i volumena (O/V) pri čemu O predstavlja površine zidova, stropova, krova i prozora dok V predstavlja volumen zgrade (predviđeni životni prostor). Što je veći omjer O/V to nam treba više toplinske energije po m^2 stambeno/uporabnog prostora.

Kompaktnija zgrada lakše ispunjava standard energetske učinkovitosti te je možemo graditi jeftinije jer su zahtjevi za debljinu izolacije manje stroži. Pod pojmom kompaktnih zgrada misli se na zgrade s jednostavnim tlocrtnim oblikom [18]. U tablici 2. možemo primijetiti različite geometrijske oblike te njihov faktor oblika. Faktori oblika su izračunati za geometrijska tijela volumena 400m^3 . Opažamo da zgrade s mnogo izbočina imaju najlošiji omjer, te da nisu povoljni za gradnju dok jednostavniji oblik poput kocke je bolji za izvedbu pasivnih kuća dok kugla ima u teoriji najbolju učinkovitost [19].

Tablica 2: Geometrijska tijela i njihov faktor oblika za volumen od 400m^3 [19]

Oblik	Oplošje	Faktor oblika	Crtež	Komentar
Kugla	263 m^2	$0,66\text{ m}^{-1}$		Kugla ima idealan faktor oblika, ali nije praktična za stanovanje
Valjak	301 m^2	$0,75\text{ m}^{-1}$		Valjak i dalje nije praktičan za stanovanje, međutim postoje zgrade slične obliku valjka (oblik oktagona)
Kocka	326 m^2	$0,81\text{ m}^{-1}$		Kocka ima praktičan oblik i faktor oblika te je idealan za izgradnju pasivnih kuća
Kvadar ($11.1 \times 6 \times 6$)	339 m^2	$0,85\text{ m}^{-1}$		Kvadar koji nije plosnat i dalje ima dobar omjer oplošja i volumena te ga to čini pogodnim za pasivne kuće
Plosnati kvadar ($16.6 \times 8 \times 3$)	414 m^2	$1,04\text{ m}^{-1}$		Plosnati kvadar zbog svog faktora oblika nema prikladan oblik za pasivne kuće
L - oblik ($13 \times 6 + 9.2 \times 6$) $\times 3$	435 m^2	$1,09\text{ m}^{-1}$		Kuća L oblika osim nepovoljnog faktora oblika ima dodatni problem zbog dijela zgrade koji baca sjenku na drugi dio
U - oblik	456 m^2	$1,14\text{ m}^{-1}$		Kuća U oblika (razvedeni oblik) zbog svog velikog oplošja i bacanja sjenki na drugi dijelove potpuno je neprikladan za izgradnju pasivnih kuća.

Za razliku od samostojećih kuća koje mogu postići faktor oblika između $0.7-1 \text{ m}^{-1}$ gradnjom većih objekata može se postići puno bolji omjer do čak 0.2 m^{-1} . Razlog bolje kompaktnosti leži u činjenici da stambene jedinice dijele gornju i donju plohu sa susjednim jedinicama stoga je smanjeno oplošje. Pasivne samostojeće kuće trebaju udovoljit zahtjev toplinske energije od 15 kWh/m^2 stoga bi trebale postići brojku manju od 0.8 [18]. Slika 14. prikazuje različite oblike gradnje te njihov faktor oblika [20].



Slika 14. Stilovi gradnje i njihov faktor oblika [20]

4.2. Utjecaj orijentacije i krajolika

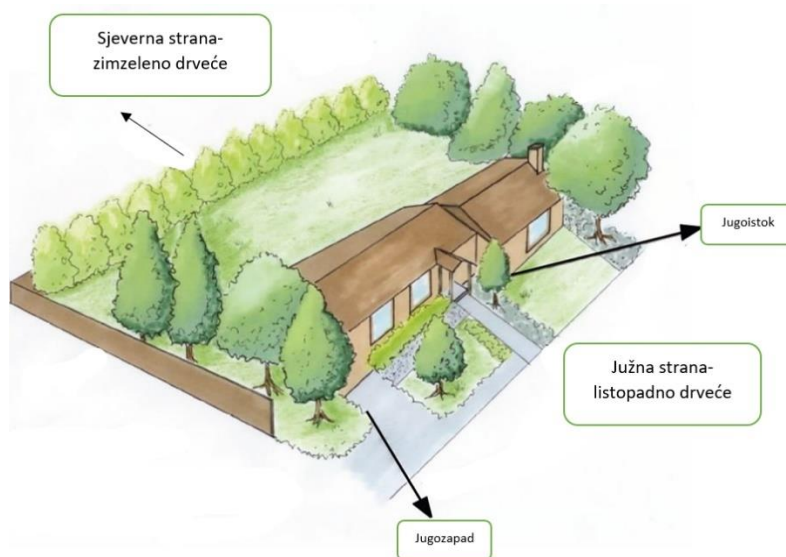
Orijentacija pasivne kuće nije uobičajena s obzirom na uobičajenu izgradnju kuće jer se više brine o manjoj energetskej potrošnji. Za ove objekte bitan je utjecaj krajolika jer doprinosi hlađenju ljeti te grijanju preko zime. Ključan čimbenik da se to postigne je dobar odabir i položaj stabala. Dobro dizajniran krajolik može uštedjeti veliku količinu energije [21].

Položaj sunca drugačije utječe na različite orijentacije kuće. Istočna strana primat će izravno jutarnje sunce, ali će poslijepodne biti zasjenjena sjenkom same zgrade, dok će zapadna strana ujutro bit zasjenjena, a popodne izložena vrućem poslijepodnevnom suncu. Južna

strana kuće je najkritičnija za pasivni solarni dizajn jer prima najviše sunčeve svjetlosti tijekom dana, ali je manje intenzivna od istočne ili zapadne strana dok je sjeverna strana kuće gotovo uvijek u hladu [21].

Drveća je ključno odabrati prema određenim kriterijima kako bi postigli što bolje očuvanje energije. Koriste se listopadna drveća zbog stvaranja sjena preko ljeta, a u jesen odbacuju lišće zbog čega sunce dopiyeva do objekta preko zimskih dana. Krošnja treba bit dovoljno gusta za optimalan potencijal sjenčanja dok otvorena granasta struktura zimi daje maksimalan pristup objektu (manji rast grančica više doprinose propuštanju sunčevih zraka). Stablo mora biti prilagođeno lokalnim temperaturnim ekstremima, prihvaćati dovoljnu količinu vode, te ne smije biti osjetljivo na velike štetočine i bolesti.

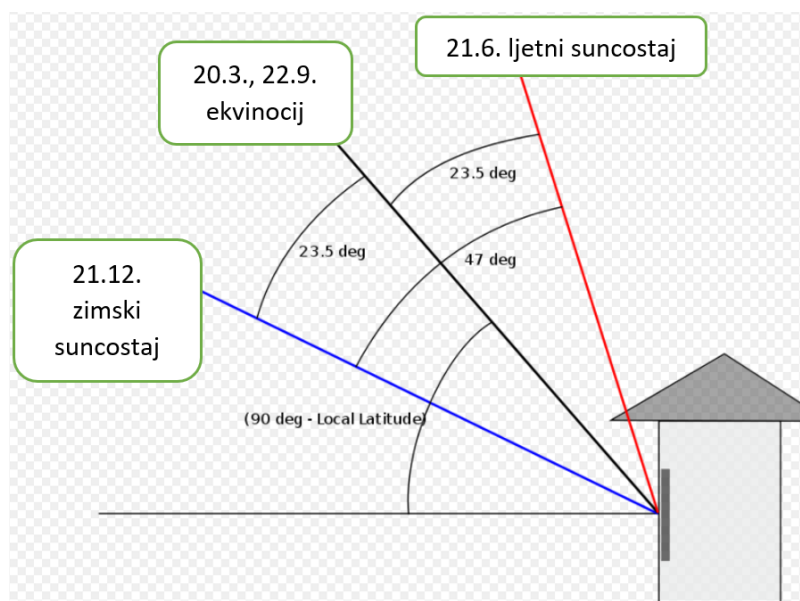
Drveće mora biti dimenzionirano da zadovolji potrebe kuće, ako imamo kuću s dvije etaže trebat će nam puno viša stabla kojima gornja polovica mora biti dovoljno široka da baci značajnu sjenku. Kod dugačkih i niskih kuća treba osigurati niska drveća s bogatom krošnjom. Stabla treba posaditi dovoljno daleko od strukture da se postignu optimalne koristi, a izbjegnu problemi s granjem i korijenjem koje mogu loše utjecati na samu građevinu. Važan je raspored postavljanja stabala gdje su šumarci najbolji način postavljanja pri čemu možemo dobiti raznolikost biljnih vrsta koja štiti od neočekivanih gubitaka poput oluja i bolesti [21]. Na slici 15. je prikazan položaj listopadnih i zimzelenih stabala. Zimzeleno drveće se postavlja na sjever kako bi se spriječio nalet hladnog vjetro preko zime, listopadno drveće se postavlja na jug kako bi preko zime kuća upijala sunce [21].



Slika 15. Postavljanje drveća (prema [21])

4.3. Utjecaj i upotreba sunčevih zraka

Prozori su važan dio pasivnih kuća jer se kroz njih dobiva velika količina sunčevih zraka zbog čega se smanjuje korištenje energije za svjetlom. Slika 16. prikazuje kut upada sunčevih zraka za vrijeme suncostaja. Bitan nam je podatak zbog dimenzioniranja strehe koja mora pružati optimalnu dubinu sjenke. Primjećujemo da se u ljetnom razdoblju štite stakla od prevelike topline i svjetline dok se u zimskom traže sunčeve zrake zbog manjka topline i svjetline [22].



Slika 16. Okvirno vrijeme suncostaja i kut sunčevih zraka (prema [22])

Na modelu u sljedećem eksperimentu su testirane upravo te dvije pasivne strategije jer su po prethodnim analizama imale najreprezentativnije rezultate s ciljem maksimalne optimizacije razine osvjetljenja te ublažavanje visoke razine. Farnsworth House je objekt smješten u državi Illinois. Pravokutnog je oblika te je specifičan po tome što joj je svaka fasada staklena. Nalazi se na istoj sjevernoj paraleli kao i Španjolska. Po toj kući je u Madridu provedena eksperimentalna analiza pasivnih strategija na dva modela. Modeli su bili u mjerilu 1/6, imali su istu geometriju, građevinska svojstva te iste vremenske uvjete. Razlikovali su se po pasivnim strategijama koji su bili ugrađeni na njihovim različitim orijentacijama kako bi se na taj način mogli usporediti rezultati s jednakim klimatskim uvjetima. Referentni model je imao monolitno staklo na svim fasadama, dok je poboljšani imao dvostruka stakla te strehu na južnoj i istočnoj fasadi koja je dodana kasnije. Solarna kontrolna prevlaka na staklima se

također preporuča u ovoj vrsti staklenih zgrada jer uvelike smanjuje osvijetljenost unutar prostora. Glavni cilj je bio analizirati pasivna rješenja koja pomažu pri smanjenju potrošnje energije korištenjem prirodnog svjetla. Nije uzeta u obzir samo energetska učinkovitost i korištenje obnovljivih izvora energije već i poboljšanje zdravlja i dobrobit korisnika. Slika 17. prikazuje Španjolski model po kojemu su se mjerili analizirali podaci [23].



Slika 17. Španjolski model - Farnsworth House [23]

Modeli su se pratili od kolovoza 2017. do srpnja 2018. sa sensorima koji su mjerili osvijetljenost i ukupno sunčevo zračenje po svim godišnjim dobima i vremenskim uvjetima. Za prikaz rezultata odabrano je najreprezentativnije razdoblje u trajanju od tri dana od svakog godišnjeg doba. Ispitali su se podaci o temperaturi okoline, analizirala osvjjetljenja prema orijentacijama te računali parametri vizualne udobnosti svjetla. Tijekom ljetne sezone uočeno je da maketa sa strehom i poboljšanim staklima ima smanjenu razinu osvjjetljenja te da strehe proizvode bolju distribuciju svjetla smanjujući razinu osvjjetljenja za 12% s obzirom na referentni model. Ovaj rezultat nam pokazuje da stakla s ugrađenim solarnim kontrolnim slojem mogu smanjiti osvjjetljenje unutar modela te da streha može proizvesti bolju distribuciju i kontrolu svjetla. U proljeće se sunčevo zračenje ravnomjernije rasporedilo po prostoru zbog manjeg solarnog visinskog kuta dok se osvijetljenost u zimi i jeseni najbolje izrazila. Analiza osvjjetljenja prema orijentaciji pokazala je da pasivne metode čine značajnu razliku kod smanjenje razine osvjjetljenosti unutar modela pri čemu istočni smjer pokazuje najbolje rezultate. Parametri vizualne udobnosti smatraju se prihvatljivim za ovakav tip ostakljene nastambe. Pomoću dobivenih rezultata ispostavlja se da je samo

minimalan doprinos umjetne rasvjete dovoljan za stambenu uporabu pri takvim klimatskim uvjetima. Studija je pokazala kako korištenje pasivnih strategija kao što su strehe te stakla s ugrađenim solarnim kontrolnim slojem u stanovima sa velikim staklenim površinama bitno utječu na potrošnju energije te udobnost i zdravlje ljudi [23].

4.4. Značaj materijala

Odabir materijala je presudno da bi se ispoštovali svi kriteriji za izgradnju pasivne kuće. Pri izgradnji konstrukcije razlikujemo različite metode gradnje pri čemu se koriste betonski blokovi, beton, drvo i opeka.

Konstrukcija kosih krovova kod pasivnih kuća je lagana. Pri gradnji zidova pasivnih kuća mogu se koristiti različite vrste konstrukcija. Razlikujemo masivne i lagane konstrukcije kojima se postižu jednaki rezultati. Odabir najčešće ovisi o željama investitora i dogovoru sa projektantom [24].

Najrašireniji način gradnje zidova pasivnih kuća je masivna gradnja od blok elemenata. Nosiva zidna konstrukcija se može graditi od blokova od betona, laganog betona, opečnih blokova ili opečnih blokova punjenih perlitom. Na vanjskoj strani se nalazi odgovarajući sloj toplinske izolacije da bi se postigao standard prolaza topline kroz zid koji ne smije biti veći od $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$. Jednoslojni zidovi bez toplinske izolacije ne mogu postići standard pasivne gradnje. Zidovi se mogu graditi i od betona koji se na gradilištu ulijeva u predgotovljene opladne elemente, prednost gradnje zidova od betona je dobra zrakonepropusnost. Posebni opladni elementi od polistirena su još jedan način izvedbu masivnih zidova. Na unutarnjoj strani nalazi se tanji sloj polistirena dok se na vanjskoj strani nalazi deblji sloj. Sklapaju se na mjestu izvedbe, a zatim se u otvore stavlja armatura te se otvori zalijevaju betonom. Prednost takve gradnje je jednostavnost izvedbe jer se ne mora skidati oplata i otklonjeni se problemi sa toplinskim mostovima. Slika 18. prikazuje gradnju opečnog zida s vanjskom toplinskom izolacijom od mineralne vune i ekstrudiranog polistirena [24].



Slika 18. Gradnja opečnog zida sa toplinskom izolacijom [24]

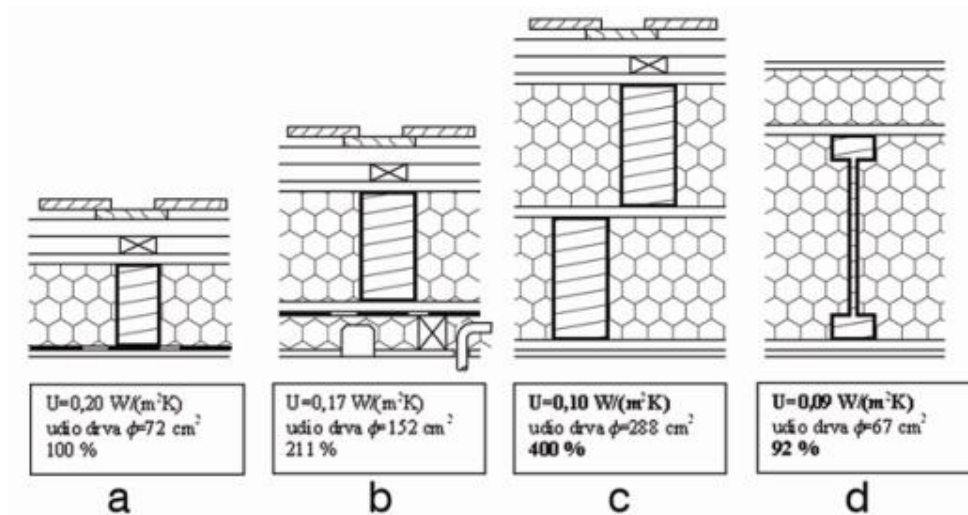
Slika 19. prikazuje blok od polistirena širine 100 cm za masivnu gradnju zidova pasivnih kuća [24].



Slika 19. Blok od polistirena [24]

Drugi način gradnje zidova pasivnih kuća je lagana gradnja gdje se najčešće koristi drvo. Za razliku od masivne gradnje gdje se toplinska izolacija nalazi s vanjske strane, kod laganih zidova se toplinska izolacija postavlja između drvene konstrukcije. S takvim načinom izvedbe drvene kuće postižu jednaku toplinsku izolaciju s manjom debljinom zida. Osnovni sustav se sastoji od stupova i greda koji čine drvene okvire. Međuprostor se može ispuniti ovčjom vunom, mineralnom vunom, toplinskom izolacijom od celuloznih pramčaka, lana

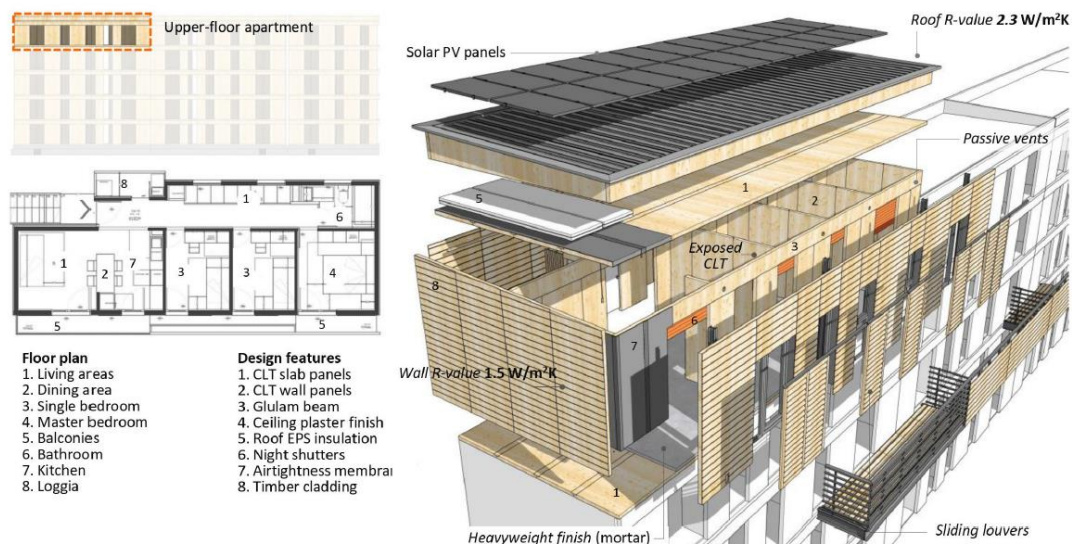
ili drvenih vlakana. Debljina drvenoga okvira je 16 cm, a to je nedovoljno da zidu pasivne kuće bude osigurana toplinska izolacija. Stoga se na vanjskoj strani zida dodaje dodatni sloj toplinske izolacije koji nosi pročeljnu žbuku. Umjesto žbuke može se postaviti ventilirana obloga pročelja od drva ili nekog drugog materijala. S unutarnje strane zida ispred parne brane izvodi se instalacijski sloj koji predstavlja dodatni sloj toplinske izolacije. Drvo ima veću toplinsku provodljivost od toplinske izolacije, a zbog velikog udjela drva u zidu stvaraju se toplinski mostovi koji znatno oslabljuju toplinsku izolaciju zida. Može se racionalizirati upotreba drva korištenjem I nosača. I nosači su sastavljeni od masivnog drva, a povezuje ih ispuna od drva koja može biti vezana ploča ili OSB ploča. Toplinska izolacija od celuloznih pramičaka se najčešće utiskuje između I nosača. Zid od I nosača pružaju 20 posto bolju toplinsku izolaciju od pravokutnih masivnih stupova te imaju visoku statičku nosivost. Smanjenje toplinskih mostova u drvenoj konstrukciji zida postiže se konstrukcijom od drvenih letava između kojih je upuhana celulozna toplinska izolacija. Slika 20. prikazuje toplinsku provodljivost laganih zidnih konstrukcija sa vrijednostima prolaza topline. Presjeci a, b i c pokazuju masivne pravokutne stupove, dok presjek d prikazuje I nosače. Masivni pravokutni stupovi zadovoljavaju kriterije pasivne kuće samo u slučaju c gdje se dodao sloj toplinske izolacije, dok I nosači zadovoljavaju vrijednost prolaska topline [24].



Slika 20. Toplinska provodljivost laganih zidnih konstrukcija [24]

4.4.1. Usporedba drva i armiranog betona

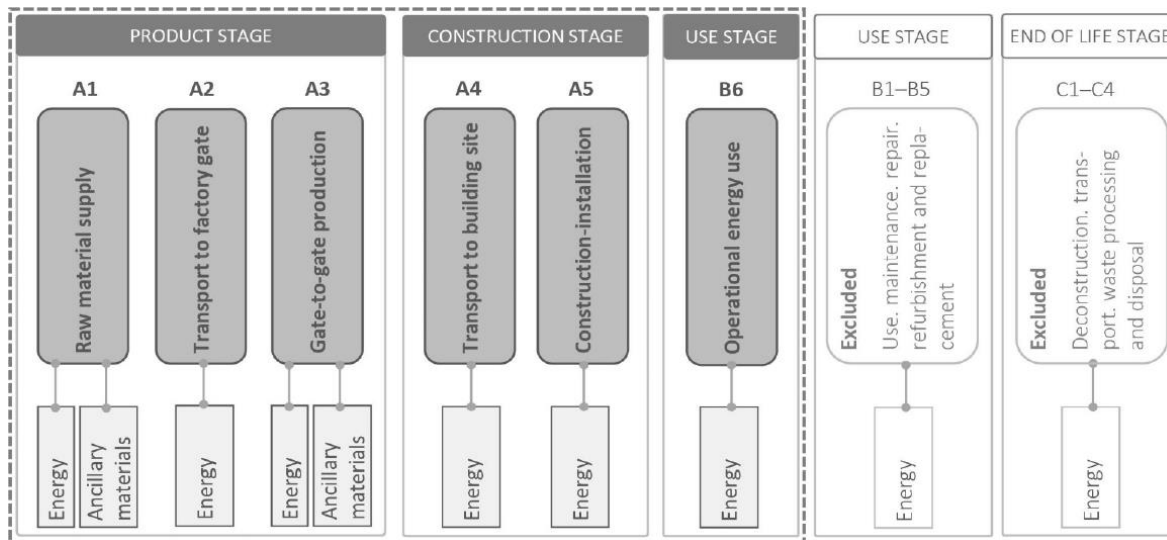
Sve više se počelo graditi drvenom građom za niskoenergetske stambene zgrade kao održiva alternativa armirano betonskoj konstrukciji. Građevinski sektor je odgovoran za oko 40% globalne emisije ugljika te brojna istraživanja pokazuju da drvo može pohraniti veliku količinu ugljika. U Čileu je provedena studija koja je usporedila dvije peterokatnice s gradnjom s različitim materijalima. Cilj je bio uspoređivanje analize životnog ciklusa drvene te armiranobetonske konstrukcije od početka gradnja sve do 50 godišnje životnog vijeka. Zgrade su istih dimenzija (28m x 5m x 13,9m) dok je jedina razlika bila u materijalu te što je drvena konstrukcija imala pasivne značajke, a betonska bila u skladu s minimalnim nacionalnim propisima. Slika 21. nam prikazuje tlocrt u kojemu je prikazan raspored prostorija i karakteristike dizajna u 3D prikazu. Posebne značajke su solarni paneli, velika vrijednost izolacije krova i zidova, pasivni ventilacijski otvori i drvena unutarnja građa [25].



Slika 21. Tlocrt i 3D prikaz drvene pasivne zgrade u Čileu [25]

Slika 22. prikazuje procjenu životnog ciklusa i njihove faze. U fazi proizvoda modul A1 uključuje opskrbu sirovina, modul A2 transport do proizvođača te modul A3 proizvodnju građevinskog materijala. Faza izgradnje se sastoji od modula A4 što uključuje transport građevinskog materijala do gradilišta i modula A5 koji predstavlja fazu instalacije. U fazi upotrebe koji predstavlja modul B6 se gleda potrošnja energije za kondicioniranje prostora

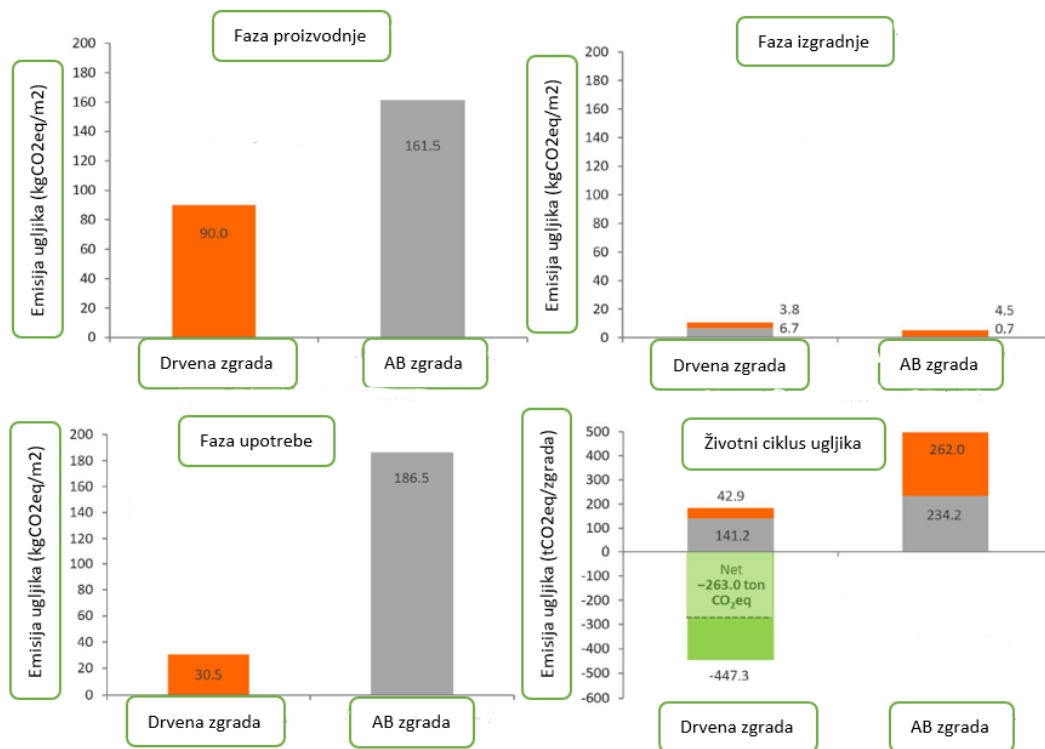
zgrade tijekom 50 godišnjeg korisnog vijeka trajanja. Ostali moduli poput održavanje zgrade, popravka i obnove nisu uključeni zbog nedostatka pouzdanih lokalnih podataka.



Slika 22. Faze izgradnje drvene i AB zgrade u Čileu [25]

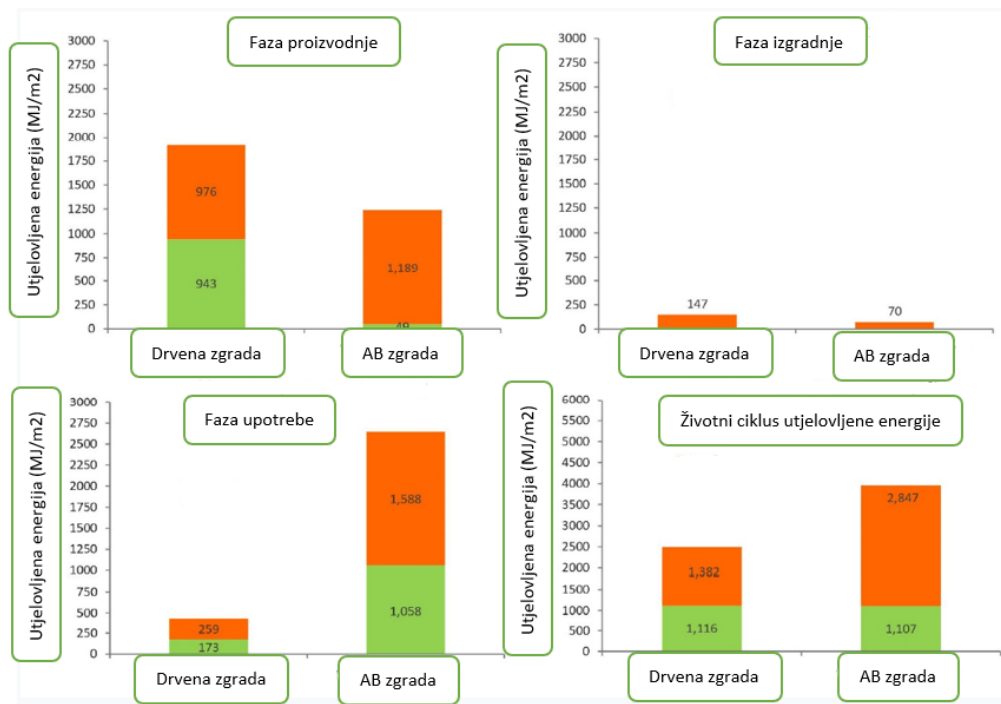
Na temelju smjernica pasivnog dizajna za klimu u Santiagu (Čile) zgrada s masivnim drvom s pasivnim značajkama ima manje zahtjeve za pomoćnu energiju pri kondicioniranju prostorija. Imaju manje mjere kod proizvodnje i izgradnje, ali pružaju veliki značaj pri smanjenju emisije tijekom korisnog vijeka trajanja.

Za obje konstrukcije beton čini najveći doprinos mase. Kod armiranobetonske zgrade čini 98% dok ostalih 2% čine čelik i žbuka. Kod drvene konstrukcije beton čini približno polovicu težine 47,8%, poprečno lamelirano drvo i ljepila 34%, a ostalih 16% cementni mort koji se koristio kao protupožarna i zvučna izolacija. Krov, zidovi i prozori pasivne zgrade imaju bolje izolacijske vrijednosti. Na slici 23. kod faze proizvodnje primjećuje se da je doprinos globalnog zagrijavanja kod drvenog dizajna 44%. U fazi izgradnje veća je emisija ugljika kod pasivne kuće zbog transporta dok je kod faze instalacije manja. Tijekom životnog vijeka od 50 godina akumulirane emisije pasivnog objekta su niže za čak 83% od armiranobetonske konstrukcije. Graf životnog ciklusa ugljika nam prikazuje da drvena zgrada pohranjuje 447 tona u svojoj strukturi zbog utjecaja fotosinteze. Zaključeno je da korištenje drvenih proizvoda pomaže u smanjenju stakleničkih plinova.



Slika 23. Utjecaj drvene i AB zgrade na emisije ugljika (prema [25])

Na slici 24. zelenom bojom je prikazana obnovljiva energija, a crvenom neobnovljiva. Može se primijetiti da drvena konstrukcija troši više utjelovljene energije u početnoj fazi gradnje. U fazi upotrebe prostorno kondicioniranje stvara veliku energetska razlika gdje niskoenergetska zgrada sa pasivnim obilježjima troši šesterostruko manja. Graf životnog ciklusa utjelovljene energije prikazuje zbroj ostalih grafova. Primjećuje se da drvena zgrada sa pasivnim značajkama troši približno jednako obnovljive energije, ali troši duplo manje neobnovljive energije. Utjelovljena energija armiranobetonske zgrade je 63% veća od drvene zgrade [25].



Slika 24. Utjecaj drvene i AB zgrade na potrošnju energije (prema [25])

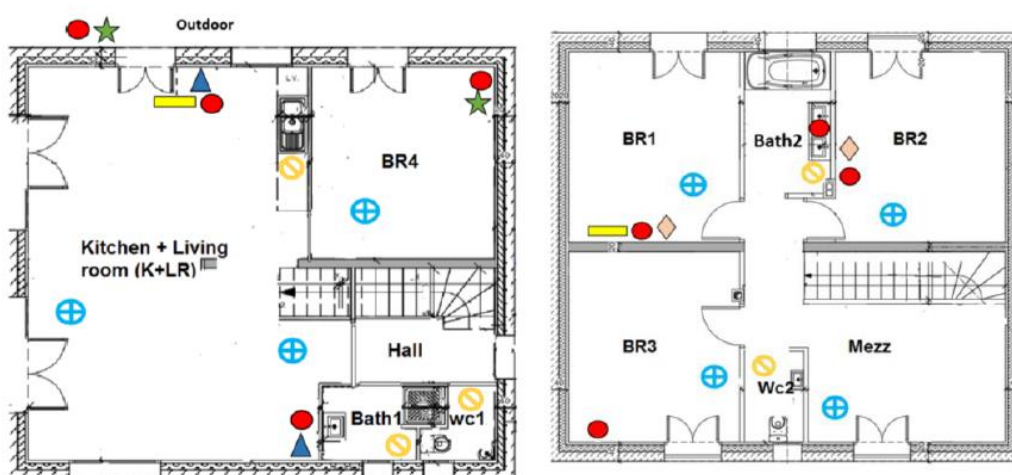
Nakon provedenog istraživanja može se isključiti da se drvom smanjuje globalno zagrijavanje radi mogućeg svojstva skladištenja ugljika. Kako ne bi došlo do njegovog oslobađanja drvene komponente nakon životnog vijeka se mogu spaliti gdje zadržavamo 85-90% ugljika. Akumulirane emisije uslijed upotrebe energije za kondicioniranja prostora dostižu 83% manju potrošnju u odnosu na armiranobetonske konstrukcije [25].

4.5. Kvaliteta zraka

Milijuni ljudi u svijetu izloženi su zagađenom zraku. Glavni izvor onečišćenom zraku u razvijenim zemljama se nalazi u zatvorenom prostoru zbog velikog vremena boravka ukućana. Skupljaju se određene onečišćene tvari koje nisu pristupne u tolikim koncentracijama u vanjskom okolišu. Zbog svojega načina ventilacije kvaliteta zraka kod pasivnih zgrada je zabilježila veći interes posljednjih godina. Kvaliteta zraka ne ovisi samo o izvorima onečišćenja već i o strujanju zraka kroz ventilaciju i temperaturnim razlikama.

Ventilacijski sustavi moraju biti pravilno ugrađeni kako ne bi došlo do negativnih posljedica na zdravlje ljudi.

U Francuskoj u planinskoj klimi je provedena studija u kojoj su se mjerili pokazatelji kvalitete zraka. To su temperatura zraka, ugljikov-dioksid (CO₂), relativna vlažnost, koncentracija čestica, formaldehid (bezbojan otrovan plin) te hlapljiv organski spoj. Eksperiment je proveden u dvije faze, jedan tjedan po zimi i jedan u proljeće. U kući su boravili dvoje odraslih nepušača i dvoje djece. Površina kuće je 135 m² dok je zapremnina 337 m³. Točnost mjerenja onečišćenih tvari je ključna te je korišteno više uređaja za iste parametre kako bi se dobili ispravni rezultati. Mjereno je svakih 10 minuta na najmanje dva mjesta u zatvorenom i otvorenom prostoru. Dovodni otvori su bili u svakoj prostoriji osim u kupaonici i kuhinji gdje su se nalazili odvodni otvori. Slika 25. prikazuje tlocrt kuće prizemlja i prvog kata. Dovodni otvori su označeni plavim krugom dok su odvodni otvori označeni žutim krugom. Ostali znakovi predstavljaju različite uređaje s kojima su se mjerili pokazatelji zraka [26].



Slika 25. Tlocrt kuće sa ventilacijskim sustavom i uređajima za mjerenje zraka [26]

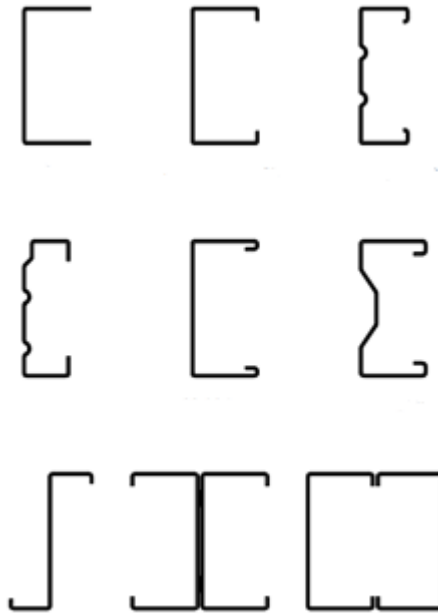
Prema dobivenim rezultatima utvrđeno je da fine čestice (PM 2,5 – jako štetan za ljudsko zdravlje jer može zaobići obrambeni sustav ljudskog organizma) nisu premašile trag štetnosti. Najveća razina se nalazila u kuhinji. Prosječne koncentracije formaldehida su bile veće od dopuštenoga u kuhinji nakon večere međutim njena izloženost prema stanarima je bila u dozvoljenim okvirima. Nažalost ukupni hlapljiv organski spoj je premašio sigurnosne

vrijednosti zbog specifičnih kratkoročnih aktivnosti poput korištenja eteričnog ulja, no koncentracija se ubrzo smanjila zbog ventilacije. Veća koncentracija CO₂ se počela pojavljivati u večernjim satima do jutarnjih gdje se naglo smanjila zbog prozračivanja. U proljeće su manje koncentracije zbog povoljnijih vremenskih uvjeta. U svim sobama je bilo uvjeta bez zagušenja, osim sobe broj 1 koja je imala nisku zagušljivost. Plinovi formaldehid i CO₂ pokazuju veće vrijednosti uz prisutnost ukućana. Relativna vlažnost nije bila u dozvoljenim granicama velik dio vremena [26].

4.6. Modularna gradnja

Modularna gradnja je proces u kojem se objekt gradi u tvornici te se doprema na gradilište u obliku modula pa se sastavljaju na gradilištu. Takvim načinom gradnje postižu se mnoge prednosti poput bolje održivosti gradnje, bolje kontrole troškova i kvalitete i učinkovitiji postupak građenja. Smanjuje se otpad na gradilištu zahvaljujući gradnjom u tvornici gdje se učinkovitije može upravljat materijalom. Module je moguće razmontirati i ponovno montirati ili renovirati čime se smanjuje potrošnja energije i potreba za novim sirovinama. Klima u modularnoj kući je zdrava i ugodna jer se najčešće koriste prirodni građevinski materijali. Troškovi i rokovi se mogu kontrolirati zahvaljujući uvijek istim radnim uvjetima i troškovima gradnje koji se kontroliraju u ranoj fazi zbog čega je modularna gradnja atraktivna za investitore. Istovremenom mogućnosti izvedbe pripremnih radova na gradilištu i konstrukcije u tvornici smanjuje se vrijeme dovršetka projekta. Na gradilištu se izvodi 10 do 40 posto svih građevinskih radova pa se smanjuje mogućnost rizika od nesreća i odgode zbog vremenskih prilika [27].

Najvažniji element u konstrukciji modularnih objekata je okvir modula. Izrađuje se od hladno oblikovanih čeličnih profila u obliku slova C ili Z ili njihovih varijanti koji su oblikovani u valjku od pocinčane čelične trake debljine 1 do 3,2 mm. Članovi se izrezuju na duljinu i sastavljaju različitim metodama povezivanja da bi se formirao strukturni okvir modularnih jedinica. Slika 26. prikazuje razne varijante čeličnih profila koji se koriste u modularnoj gradnji za izradu okvira [28].



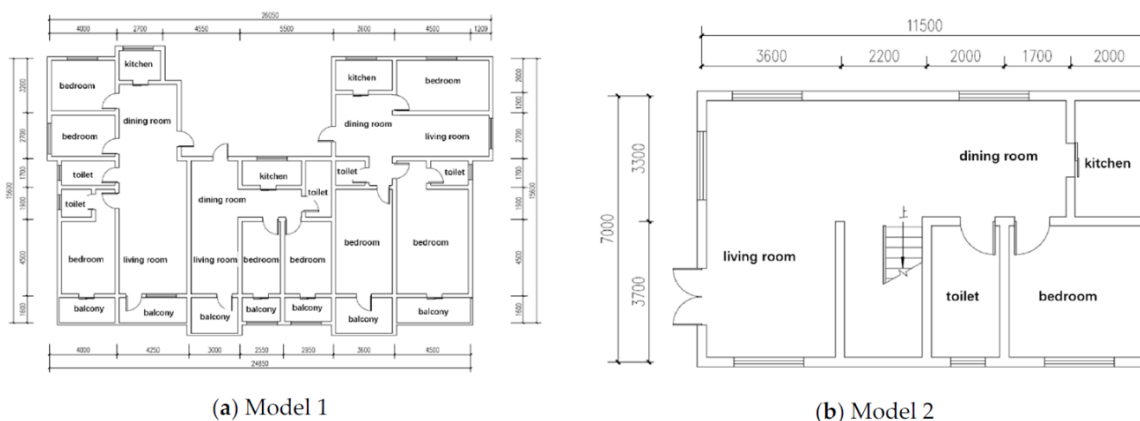
Slika 26. Čelični profili za izradu modularnih okvira [28]

Jedne od glavnih prednosti korištenja laganog čeličnog okvira su: izdržljivost i lakoća materijala tijekom dizanja i transporta, jednostavna brzina izrade, dobra otpornost na vertikalna opterećenja, visoka razina zvučne i toplinske izolacije, otpornost na požar i trajnost materijala [28].

Slaganjem modularnih blokova kod višekatnih stambenih blokova moraju se postići zahtjevi zaštite od požara i smanjenju buke između stanova. Također, drvo se pri velikim opterećenjima deformira pa se rješenje nalazi u hibridnoj gradnji. Koriste se biomaterijali i kombinacije recikliranog betona i čelika. Sa betonom se grade betonski podovi, čelik se koristi kao potpora betonskoj konstrukciji i pričvršćuju CLT zidove. Kod stambenih zgrada koje u prizemlju imaju poslovni prostor zahtjeva se ugradnja betonskog poda kako bi se osigurala stabilnost i zaštita od požara. Jezgre visokih zgrada koje sadrže dizala ili stubišta često se koriste za osiguranje stabilnosti zgrade i iz tog razloga beton ili čelik je nužno koristiti [17].

5. RAZLIKE IZMEĐU PASIVNIH KUĆA U DRUGIM KLIMATSKIM ZONAMA

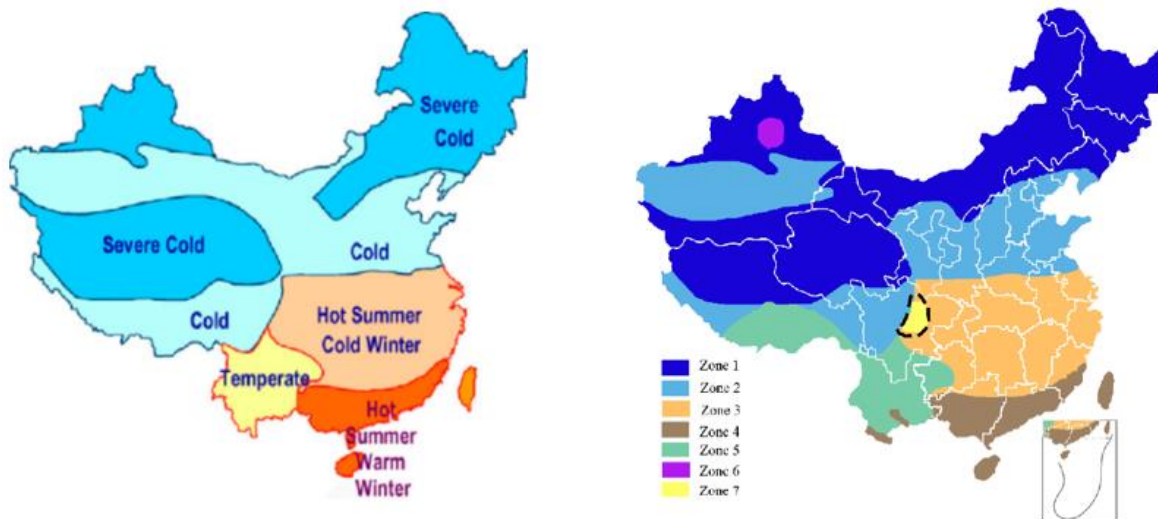
Dizajn i primjena pasivnih kuća varira s različitim klimatskim uvjetima. Temeljni tehnički pokazatelji određuju se u klimatskim uvjetima srednje Europe stoga se u drugim klimatskim zonama pasivne kuće moraju prilagođavati. Kineska studija je provela parametrizaciju i predložila odgovarajući dizajn zoniranja pasivnih kuća u Kini. Odabran je 31 reprezentativni grad u 5 klimatskih regija: jako hladna (SC), hladna (C), vruća ljeta i hladna zima (HSCW), vruća ljeta i topla zima (HSWW) i topla zona (M). Pokazalo se da ključni parametri koji utječu na potrošnju energije su: koeficijent prolaza topline vanjskog zida (WU), koeficijent topline prolaza kroz strop (BCU), koeficijent dobivanja sunčeve topline (SHGC), vrijednost G stakla (UG), povrat toplinske učinkovitosti (HERE) i učinkovitost povrata vlage (HURE). Za simulaciju potrošnje primarne energije te grijanja i hlađenja koristio se PHPP softver. Uspostavljena su dva modela stambenih zgrada. Reprezentativna pasivna zgrada na 18 katova te 352 m² po etaži i obiteljska kuća na dvije etaže sa cjelokupnom površinom od 150 m². Slika 27. prikazuje tlocрте dva modela stambenih zgrada [29].



Slika 27. Tlocрте reprezentativnih zgrada za određivanje klimatskih zona za pasivne kuće [29]

Preko opće analize parametara uspostavilo se da M područje ne treba dodatno optimizirati. Preko analize parametara za različite klime smatra se da vrijednost koeficijentata za dobivanje sunčeve topline je najutjecajniji čimbenik u svim klimatskim zonama. WU, BCU, UG, HERE su značajni za područja koja zahtijevaju grijanje, dok je HURE važan za područja

kojima treba hlađenje i odvlaživanje. Za hladne i jako hladne regije parametri za različite tipove zgrada imaju velike oscilacije u izuzetku vrijednosti G stakla dok u toplijim područjima glavni parametri nemaju prevelike razlike. Nakon detaljnijeg analiziranja ključnog parametra (koeficijent dobivanja sunčeve topline) zaključeno je da on ovisi o geografskom položaju i klimi, te doprinosi grijanju u hladnijim regijama (SC i C) i hlađenju i odvlaživanju u toplijim (HSWW i HSCW). Na temelju parametarske analize predložila se poboljšana zona projektiranja za pasivne kuće koja daje podlogu za smanjenje energetske potrošnje. Na slici 28. prikazana je opća podjela klimatskih regija u Kini na lijevoj strani [30] i poboljšana zona za projektiranje za pasivne kuće na desnoj strani [29].



Slika 28. Podjela klimatskih zona u Kini [30] i predložena podjela projektiranja pasivnih kuća [29]

Došlo je do spoznaja da zgrade orijentirane prema jugu daju najbolje rezultate za energetske učinkovitost u svih 5 klimatskih zona zbog iskorištavanja sunčanih zraka i postizanja osnovnih zahtjeva za dnevnom rasvjetom. Također zgrade u toploj zoni lako mogu postići standard pasivne kuće dok se u ostalim zonama to teže postiže. U hladnijim zonama hlađenje nije potrebno, dok je najbitniji parametar poboljšanje toplinske izolacije kojim se postiže najbolji učinak energetske potrošnje.

Smanjenje potrošnje u jako hladnim regijama dostiže 18-24%, a u hladnijim 15%. U regiji gdje su ljeta vruća i zime hladne treba uzeti u obzir oba zahtjeva za energiju (grijanje/hlađenje), smanjenje se postiže od 16% do 19%. U toplijim regijama dolazi do pregrijavanje te učinak zasjenjenja dolazi do utjecaja. Studija nam je predložila koncept

zoniranja pasivnih kuća u Kini koji se sastoji od 7 zona. Za svaku zonu su nam važni različiti parametri dok nam je najvažniji parametar koeficijent dobivanja sunčeve topline. Pri izradi pasivnih kuća u drugim klimatskim zonama važno se usredotočiti na parametre tijekom ranog procesa projektiranja jer može značajno smanjit potrošnju energije.

6. PREDNOSTI I NEDOSTACI PASIVNIH KUĆA

Pasivna kuća ima puno više prednosti od nedostataka. Korištenjem energije iz obnovljivih izvora smanjuje se ukupna emisija stakleničkih plinova. Visoka energetska učinkovitost se postiže zbog nepropusne ovojnice zgrade koja mora biti kvalitetno napravljena kako ne bi dolazilo do toplinskih mostova. Upotrebom rekuperatora ostvaruje se dotok svježeg zraka i kontinuirana temperatura koja dovodi do povećane toplinske ugodnosti. Pasivna kuća ne mora nužno biti kuća kako naziv kaže već se mogu graditi i kompleksnije građevine poput poslovnih zgrada, škola, vrtića, supermarketa i mnogih drugih. Najveći nedostatak je neinformiranost stanovništva i struke o konceptu pasivnih kuća što dovodi do nedovoljnog broja kvalificirane radne snage i većih početnih troškova gradnje. Zbog dugoročnih ušteda na režijama pasivna kuća se pokazuje kao isplativa investicija bez obzira na veće početne troškove građenja. Pasivna kuća zahtijeva jednostavnije vanjsko oblikovanje zbog čega se struka mora dodatno potruditi da vanjski izgled ne bude neprivlačan stanovništvu. Kod starijih zgrada je puno teže postizanje standarda pasivnih kuća zbog zadržavanja toplinskih mostova. Toplinski mostovi dovode do povećane energetske potrošnje, mogućnosti pojave gljivica i plijesni te umanjene toplinske ugodnosti. U tablici 3. su prikazani svi prednosti i nedostaci pasivne kuće.

Tablica 3: Prednosti i nedostaci pasivne kuće

PREDNOSTI	NEDOSTACI
Visoka energetska učinkovitost	Veći početni troškovi gradnje
Zbog niskog CO ₂ otiska pasivne kuće su prihvatljive za okoliš	Nedovoljan broj kvalificirane radne snage
Zbog svojeg niskog utjecaja na okoliš smatra se zgradom za budućnost	Neinformiranost stanovništva i struke o konceptu pasivnih kuća
Kontinuirana temperatura i svjež zrak dovodi do zdravije okoline i većeg osjećaja udobnosti	Potrebno jednostavnije vanjsko oblikovanje
Dizajn sa odličnom <u>zrakonepropusnošću</u> bez toplinskih mostova	Postizanje standarda pasivne kuće kod starijih zgrada nije uvijek isplativo te se koncept pasivne kuće uglavnom koristi u novogradnji
Moguća primjena u većini klimatskih zona uz određene preinake	
Dugoročne uštede na režijama dovode do isplative investicije	
Ne zahtijeva posebne građevinske materijale	
Mogućnost građenja većih objekata	

7. ZAKLJUČAK

Završni rad prikazuje osnovne značajke pasivnih kuća i daje pregled i zaključke studija koje su provedene vezano uz pojedine značajke. Glavni razlog pojave pasivnih kuća bila je druga naftna kriza kada je nastupio viši standard građenja. Do standarda pasivnih kuća dolazi se pažljivim planiranjem i pridržavanjem osnovnih principa. Osnovni principi predstavljaju visokokvalitetnu izolaciju bez mogućnosti pojave toplinskih mostova, troslojne prozore s niskom G vrijednošću, zrakonepropusnost konstrukcije i mehaničku ventilaciju s povratom topline. Kako bi postigli tražene kriterije koristimo energiju iz obnovljivih izvora. Uz rekuperator koji je obavezan, u sustav je poželjno primijeniti zemljani kolektor i solarne panele da bi se postigla minimalna potrošnja energije. 2021. godine kada se trebao osmisлити koncept stanovanja s ciljem ekonomskog i ekološkog prihvatljivog sustava koji će doprinositi u sadašnjosti i budućnosti ustanovilo se da je modularna gradnja najpristupačnija. Zgrade s jednostavnim tlocrtnim oblikom znatno utječu na smanjenje transmisijskih gubitaka. Najpovoljniji faktor oblika ima kugla, dok je kocka najpraktičnija i najidealnija za izgradnju pasivnih kuća. Za najkvalitetnije iskorištavanje sunčevih zraka prozori većih dimenzija su orijentirani prema jugu. Kako bi se optimizirao problem prevelike svjetline i topline ljeti te nedovoljno zimi koriste se određeni premazi na staklima, položaj strehe i krajolika. Drveće je ključno odabrati prema određenim kriterijima. Listopadna drveća postavljaju se na jugu radi zasjenjenja prozora preko ljeta i propuštanje zraka zimi dok se zimzelena postavljaju na sjeveru da bi se spriječio nalet hladnog vjetra preko zime. Streha mora biti pravilno dimenzionirana kako bi zimske zrake koje imaju mali kut upada prolazile kroz prozor dok bi ljetne s visokim kutom bile spriječene strehom. Zbog velike globalne emisije ugljika u građevinskom sektoru sve se više počelo graditi drvenom građom za niskoenergetske stambene zgrade. Studija u Čileu je pokazala da tijekom 50 godišnjeg životnog vijeka konstrukcije akumulirane emisije pasivnog objekta su niže za čak 83% od armiranobetonske konstrukcije i da im je utjelovljena energija 63% veća od drvene zgrade. Zbog načina ventilacije pasivna kuća ima puno ugodniju i kvalitetniju klimu što vodi boljem zdravlju. Studija u Kini nam je prikazala da se pasivne kuće mogu graditi u više klimatskih zona i da je najbitniji parametar koeficijent dobivanja sunčeve topline. Zgrade u toploj zoni lakše postižu standard pasivne kuće dok se u ostalim zonama trebaju napraviti određene modifikacije.

LITERATURA

- [1] Rockwool.com, <https://www.rockwool.com/group/about-us/our-thinking/energy-efficiency/passive-houses/>, pristup 22.02.2022.
- [2] What is passivhaus ventilation, <https://www.paulheatrecovery.co.uk/info/what-is-passivhaus-ventilation/>, pristup 28.02.2022.
- [3] Passipedia.org, https://passipedia.org/basics/building_physics_basics/what_defines_thermal_bridge_free_design, pristup 12.03.2022.
- [4] Gradnja_kuce.com <https://gradnjakuce.com/pasivna-niskoenergetska-gradnja/pasivna-kuca-zasto-bi-to-bio-vas-odabir/>, pristup 12.03.2022.
- [5] Webgradnja.hr, <https://webgradnja.hr/clanci/skola-izoliranja-niskoenergetski-i-pasivni-objekti/1080>, pristup 12.03.2022.
- [6] Niskoenergetska_kuca, https://www.wikiwand.com/hr/Niskoenergetska_kuca, pristup 18.06.2022.
- [7] Prozori_i_vrata.com, <https://www.prozorivrata.com/hr/plemeniti-plinovi-i-toplinska-izolacija-u-prozorima/>, pristup 20.05.2022.
- [8] BZ-plan-projekt.hr, <https://bz-plan-projekt.hr/2020/02/28/pvc-stolarija/>, pristup 20.05.2022.
- [9] Korak.com.hr, <https://korak.com.hr/korak-030-lipanj-2010-pasivna-kuca-6-dio-dizalice-topline-2-dio/>, pristup 18.03.2022.
- [10] Mcsolar.hr, <https://mcsolar.hr/rekuperacija-zraka/>, pristup 18.03.2022.
- [11] Pločasti solarni kolektor, <https://termometal.hr/solarni-kolektori-solimpeks-grupa-557/>, pristup 18.03.2022.
- [12] Solar enhanced ventilation, <https://passivehouseplus.ie/articles/ventilation/solar-enhanced-ventilation?highlight=WyJzb2xhciIsInNvbGFyJ3MiLCInc29sYXliXQ==>, pristup 18.03.2022.
- [13] Senegačnik Zbašnik, M. (2009) *Pasivna kuća*. Zagreb: Sun arh.

- [14] 15.međunarodni simpozij o kvaliteti, kvaliteta rasti i razvoj, Zagreb Hrvatska 19.-21.3.2014.; Certificiranje pasivne kuće; prof.dr.sc. Nina Štirmer, dr.sc. Bojan Milovanović, mag.ing.aedif. Filip Lavriv; Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
- [15] Certification_buildings, https://passivehouse.com/03_certification/02_certification_buildings/02_certification_buildings.htm, pristup 19.07.2022.
- [16] Cvetko, J.: Jutarnji_list, <https://www.jutarnji.hr/domidizajn/interijeri/profesor-miscevic-posljednji-je-trenutak-za-visoko-energetski-ucinkovitu-obnovu-nakon-potresa-15120608>, pristup 12.03.2022.
- [17] Oorschot, L.; Asselbergs, T. New Housing Concepts: Modular, Circular, Biobased, Reproducible, and Affordable. Sustainability **2021**, 13, 13772. <https://doi.org/10.3390/su132413772>, pristup 25.02.2022.
- [18] Egenius.at, https://www.egenius.at/fileadmin/user_upload/lernfelder/energieeffiziente_gebaeudekonzepte/alt/en/web/what_shape_is_particularly_advantageous_for_a_passive_house.html, pristup 22.02.2022.
- [19] Low_energy_home, <https://www.sites.google.com/site/lowenergyhome/architectur>, pristup 22.02.2022.
- [20] Local_impact_design.ca, <https://localimpactdesign.ca/passive-house/>, pristup 22.02.2022.
- [21] Landscape_design, <https://www.landscapingnetwork.com/landscape-design/sustainable/solar.html>, pristup 22.02.2022.
- [22] Pasivna_sunčeva_arhitektura, https://hr.wikipedia.org/wiki/Pasivna_sunčeva_arhitektura, pristup 22.02.2022.
- [23] Aguilera-Benito, P.; Piña-Ramírez, C.; Varela-Lujan, S. Experimental Analysis of Passive Strategies in Houses with Glass Façades for the Use of Natural Light. Sustainability **2021**, 13, 8652. <https://doi.org/10.3390/su13158652>, pristup 25.02.2022.
- [24] Zbašnik-Senegačnik, M., *Konstrukcije zidova pasivne kuće*, Građevinar 62, Zagreb, 2010

- [25] Felmer, G.; Morales-Vera, R.; Astroza, R.; González, I.; Puettmann, M.; Wishnie, M. A; Lifecycle Assessment of a Low-Energy Mass-Timber Building and Mainstream Concrete Alternative in Central Chile. *Sustainability* **2022**, *14*, 1249. <https://doi.org/10.3390/su14031249>, pristup 25.02.2022.
- [26] Kanama, N.; Ondarts, M.; Guyot, G.; Outin, J.; Gonze, E. Indoor Air Quality Campaign in an Occupied Low-Energy House with a High Level of Spatial and Temporal Discretization. *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 11789. <https://doi.org/10.3390/app112411789>, pristup 25.02.2022.
- [27] Modular construction, <https://www.modular.org/what-is-modular-construction/>, pristup 5.09.2022.
- [28] Lawson, R.; Modular construction using light steel framing: an architect's guide; The steel construction institute; Silwood Park 1999. https://www.steelconstruction.info/images/f/fd/SCI_P272.pdf, pristup 25.02.2022.
- [29] Li, X.; Deng, Q.; Ren, Z.; Shan, X.; Yang, G. Parametric Study on Residential Passive House Building in Different Chinese Climate Zones. *Sustainability* **2021**, *13*, 4416. <https://doi.org/10.3390/su13084416>, pristup 25.02.2022.
- [30] Five climate zones and relevant typical cities in China, https://www.researchgate.net/figure/Five-climate-zones-and-relevant-typical-cities-in-China_fig1_283651754, pristup 12.03.2022.