

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



ISAK ALIJAGIĆ

**UČINKOVITOST DVOJNE FASADE Z VIDIKA
KAKOVOSTI NOTRANJEGA OKOLJA IN RABE
ENERGIJE: PRIMER SOP KRŠKO**

MAGISTRSKO DELO

**MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM DRUGE
STOPNJE
STAVBARSTVO**

Ljubljana, 2018

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500 faks
(01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM DRUGE
STOPNJE STAVBARSTVO

Kandidat/-ka:

ISAK ALIJAGIĆ

**UČINKOVITOST DVOJNE FASADE Z VIDIKA
KAKOVOSTI NOTRANJEGA OKOLJA IN RABE
ENERGIJE: PRIMER SOP KRŠKO**

**EFFICIENCY OF DOUBLE SKIN FACADE FROM THE
ASPECTS OF INDOOR ENVIRONMENTAL
QUALITY AND ENERGY USE: EXAMPLE OF
SOP KRŠKO**

Mentor/-ica:

doc. dr. Mateja Dovjak

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:

izr. prof. dr. Uroš Stritih

Član komisije:

2018

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

» Ta stran je namenoma prazna «

BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	692.232:697.9(497.4)(043.3)
Avtor:	Isak Alijagić
Mentor:	doc. dr. Mateja Dovjak
Somentor:	izr. prof. dr. Uroš Stritih
Naslov:	Učinkovitost dvojne fasade z vidika kakovosti notranjega okolja in rabe energije: primer SOP Krško
Tip dokumenta:	Magistrsko delo
Obseg in oprema:	84 str., 41 pregl., 42 sl., 5 graf., 1 en., 0 pril.
Ključne besede:	dvojna fasada, energijska učinkovitost, naravno prezračevanje, toplotno udobje

Izvleček

Zahteve po energijski učinkovitosti stavb, notranje udobje in varovanje okolja morajo iti z roko v roki. V zadnjem času je vedno več govora o zmanjševanju emisij CO₂, ter povečanju energijske učinkovitosti in deleža obnovljivih virov energije. Namen dela je na konkretnem primeru stavbe-SOP Krško, t.j. prvem primeru dvojne steklene fasade v Sloveniji, analizirati delovanje dvojne fasade z vidika izbranih parametrov energijske učinkovitosti in notranjega udobja. Na začetku naloge smo pogledali zakonodajne osnove z naborom kriterijev učinkovite rabe energije in udobja. Bazo sta predstavljala Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah (PURES) in Gradbeni zakon, Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb, v pomoč pa nam je bila tudi Tehnična smernica TSG-1-004:2010-Učinkovita raba energije ter področni standardi in priporočila. Glavni del naloge predstavlja analiza stavb z dvojno fasado, kjer smo s pomočjo raziskav na tem področju predstavili koncept njihovega delovanja in preučili primere dobre prakse. Na podlagi pregledane literature in dejanskega stanja našega objekta smo podali razloge za neučinkovitost delovanja dvojne fasade. Na objektu smo izvedli meritve (osvetljenost, hrup, temperatura zraka, vlažnost zraka, hitrost gibanja zraka v prezračevalni votlini) in jih primerjali z zahtevanimi in/ali priporočenimi vrednostmi. V zadnjem delu naloge smo nato s programskim orodjem DesignBuilder preučili dejansko stanje in določili potrebno letno energijo za ogrevanje in hlajenje omenjenega prostora ter analizirali izbrane parametre udobja. V ta namen smo izdelali 3 variante modelov: model z zaprto dvojno fasado, model z odprto dvojno fasado in model z običajno enojno fasado. Dobljene vrednosti različnih modelov smo primerjali med seboj. Prišli smo do ugotovitve da najmanj energije za hlajenje na letnem nivoju porabi model z odprto fasado (46,2 kWh/(m²a)), za

ogrevanje pa model z zaprto fasado ($26,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$). Obe vrednosti sta bile dobljeni z računsko metodo prezračevanja (prezračevanje je bilo prisotno tako v votlini kot v prostorih). Najmanjša skupna primarna energija se pojavi pri modelu z zaprto fasado in računsko metodo prezračevanja, in sicer $456 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Analiza izbranih parametrov toplotnega udobja ja pokazala, da so bolj udobne razmere dosežene pri modelih z dvojno fasado. Pri modelu z enojno fasado pa ne dosežemo udobja zaradi previsoke občutene temperature. Na koncu smo vrednosti primerjali še z zakonodajo, ter podali ukrepe za izboljšanje delovanja dvojne fasade.

BIBLIOGRAPHIC - DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	692.232:697.9(497.4)(043.3)
Author:	Isak Alijagić
Supervisor:	assist. Prof. Mateja Dovjak, Ph.D.
Cosupervisor:	prof. Uroš Stritih, Ph.D.
Title:	Efficiency of double skin facade from the aspects of indoor environmental quality and energy use: example of SOP Krško
Document type:	Master thesis
Scope and tools:	84 p., 41 tab., 42 fig., 5 ch., 1 eq., 0 ann.
Keywords:	double skin facade, energy performance, natural ventilation, thermal comfort

Abstract

Requirements for the energy performance of buildings, indoor comfort and environmental protection should go hand in hand. For this reason, there has been more and more talk about reducing CO₂ emissions recently and increasing energy efficiency and use of renewable energy sources. The purpose of the work is analyzing the operation of the double skin facade on the concrete case of the SOP-Krško building (the first example of a double skin façade in Slovenia) in terms of energy efficiency and indoor comfort. At the beginning of the task, we reviewed the legislative bases with a set of criteria for the efficient energy use. The database presented the Rules on efficient use of energy in buildings with a technical guideline (PURES) and the Building Act (Gradbeni zakon), Rules on the ventilation and air-conditioning of buildings (Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb), with the help of the Technical Guideline TSG-1-004:2010-The Efficient Use of Energy (Tehnična smernica-Učinkovita raba energije). The main part of the task is the analysis of double skin facade in general, where we tried to present the concept of their operation through researches in this field and take a look at examples of best practice. Based on the reviewed literature and the actual state of our object, we gave reasons for the ineffectiveness of the operation of double skin façade. On the building we also performed the measurements (illumination, noise, temperature, humidity, velocity of air movement in the ventilation cavity), and compared them with the standards and recommendations. In the final part of the task, we then tried to present the actual situation and determine the required annual energy for heating and cooling in the measuring room. For this purpose, we developed three variants of models: closed double skin facade, opened double skin facade and common one-skin facade. using the DesignBuilder software tool.

The values obtained from different models were compared with each other. We came to conclusion that the minimum annual cooling loads are achieved at open facade model ($46.2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$), and minimum annual heating loads at closed facade model ($26.8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$). Both values were obtained by ventilation using the calculated method (ventilation was present both in the cavity and in the rooms). The smallest total primary energy occurs in the closed facade model with the calculated method of ventilation, namely $456 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. The analysis of the selected parameters of thermal comfort showed that more comfortable conditions were achieved in the models with a double façade. In the case of a single facade model, comfort is not achieved due to too high operative temperatures. In the end of the task all values were compared with the legislation. Finally we introduced measures to improve the functioning of the double skin façade.

ZAHVALA

Najprej bi se rad zahvalil svoji družini za vzpodbudo, potrpežljivost in materialno pomoč s katero so mi omogočili vsa leta študija.

Hvala tudi vsem prijateljem, ki ste mi skozi študij stali ob strani, mi pomagali ali na kakršen koli način pripomogli k končanju študija.

Posebna zahvala gre mentorici doc. dr. Mateji Dovjak ter somentorju izr. prof. dr. Urošu Stritihu za nasvete, pomoč in predvsem veliko mero potrpljenja pri izdelavi naloge.

» Ta stran je namenoma prazna «

KAZALO VSEBINE

BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	III
BIBLIOGRAPHIC - DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	V
ZAHVALA	VII
1 OZADJE PROBLEMA IN NAMEN NALOGE	1
2 CILJI IN HIPOTEZE	3
3 TEORETIČNE OSNOVE IN ZAKONODAJA.....	4
3.1 Splošno.....	4
3.2 Pravilnik o učinkoviti rabi energije.....	5
3.3 Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb	8
3.4 Gradbeni zakon	8
3.5 Izračun potrebne energije za ogrevanje in hlajenje stavbe.....	10
4 METODA.....	13
4.1 Pregled literature	13
4.2 Opis obravnavanega objekta	13
4.3 Izbran prostor za izvedbo meritev	14
4.4 Uporabljena merilna oprema.....	15
5 STAVBE Z DVOJNO FASADO.....	17
5.1 Zgodovina dvojnih fasad.....	17
5.2 Splošno.....	18
5.3 Delitev dvojnih fasad	19
5.4 Strujanje zraka v prezračevalnem kanalu.....	22
5.5 Širina prezračevalnega kanala.....	22
5.6 Senčila.....	23
5.7 Zasteklitev	24
5.8 Sončno sevanje in orientacija.....	25
5.9 Prezračevanje s pomočjo vetra.....	25

5.9.1	Prezračevanje v dnevnem času.....	25
5.9.2	Nočno prezračevanje/hlajenje	27
5.10	Čiščenje prezračevalnega kanala	29
5.11	Upravičenost dvojne fasade in stroški	29
5.12	Energijska učinkovitost dvojnih fasad.....	30
5.13	Primeri dobre prakse.....	33
5.13.1	Manitoba Hydro Place	33
5.13.2	One Angel Square	33
5.13.3	Auckland's Glittering Green Geyser Office	34
6	STAVBA SOP KRŠKO	36
6.1	Splošno	36
6.2	Sistemi za ogrevanje, hlajenje	37
6.3	Napake pri delovanju dvojne fasade.....	38
7	MERITVE	40
7.1	Meritve osvetljenosti na delovni ravni	40
7.1.1	Meritve v oblačnem vremenu	41
7.1.2	Meritve v jasnem vremenu.....	44
7.2	Meritve hitrosti gibanja zraka.....	47
7.2.1	Izvajanje meritev z zaprtimi spodnjimi in zgornjimi loputami	48
7.2.2	Izvajanje meritev z odprtimi spodnjimi in zgornjimi loputami.....	50
7.2.3	Izvajanje meritev z odprtimi spodnjimi in zgornjimi loputami v oblačnem vremenu	53
7.3	Ostale meritve izbranih parametrov kakovosti notranjega okolja	53
7.3.1	Meritve hrupa.....	53
7.3.2	Meritve temperature zraka in površin	54
7.3.3	Meritve relativne vlažnosti zraka	54
8	SIMULIRANJE RABE ENERGIJE S PROGRAMSKIM ORODJEM DESIGNBUILDER.....	55
8.1	Splošno	55
8.2	Vhodni podatki za izvedbo analize.....	55
8.3	Modeli.....	61
8.3.1	Model z zaprto dvojno fasado	62
8.3.2	Model z odprto dvojno fasado.....	69
8.3.3	Model s klasično enojno fasado	72

8.4 Analiza toplotnega okolja.....	73
8.5 Primerjava modelov med seboj in z zakonodajo.....	75
8.5.1 Primerjava med modeli.....	75
8.5.2 Toplotne prehodnosti.....	76
8.5.3 Osvetljenost.....	76
8.5.4 Hitrost gibanja zraka.....	77
8.5.5 Hrup, temperatura in vlaga.....	77
8.5.6 Energija za ogrevanje, hlajenje, primarna energija.....	77
8.6 Ukrepi.....	78
9 ZAKLJUČKI IN UGOTOVITVE.....	80
VIRI.....	82

KAZALO TABEL

Tabela 1: Največje dovoljene vrednosti primarne energije za skoraj nič-energijske glede na vrsto stavb v RS [kWh/m ²].....	4
Tabela 2: Ključni členi PURES-a Ur. l. RS, št 52/2010.....	5
Tabela 3: Ključni členi Pravilnika o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Ur. l. RS, št. 42/02, 105/02, 110/02 – ZGO-1 in 61/17 – GZ)	8
Tabela 4: Ključni členi Gradbenega zakona Ur. l. RS, št. 61/2017	9
Tabela 5: Prihranek energije v %	32
Tabela 6: Transmisivnosti zasteklitev v jasnem vremenu na dan 29.4.2017 ob 12:00 [-]	41
Tabela 7: Transmisivnosti zasteklitev v oblačnem vremenu na dan 18.4.2017 ob 12:00 [-]	41
Tabela 8: Podaki o meritvah osvetljenosti v oblačnem vremenu	41
Tabela 9: Horizontalna osvetljenost na dan 18.4.2017 [lx]	42
Tabela 10: Vrednost KDS faktorja (%) na dan 18.4.2017	43
Tabela 11: CIBSE standard za vrednosti KDS	43
Tabela 12: Podatki o meritvah osvetljenosti v jasnem vremenu	44
Tabela 13: Horizontalna osvetljenost v lx na dan 29.4.2017	45
Tabela 14: Priporočene vrednosti za urade in pisarne, primerjava s standardom.....	46
Tabela 15: Vrednost Ro _j na dan 29.4.2017.....	46
Tabela 16: Hitrosti in temperature zraka za 1. in 2. nadstropje pri zaprtih loputah na dan 14.6.2017 ..	48
Tabela 17: Povprečna vrednost hitrosti in temperatur zraka pri zaprtih loputah na dan 14.6.2017	49
Tabela 18: Hitrosti in temperature zraka za 1. in 2. nadstropje pri odprtih loputah na dan 14.6.2017..	51
Tabela 19: Povprečne vrednosti hitrosti in temperatur zraka pri odprtih loputah na dan 14.6.2017.....	52
Tabela 20: Hitrosti in temperatura zraka pri odprtih loputah pri oblačnem vremenu na dan 20.6.2017	53
Tabela 21: Konstrukcijski sklop zunanje stene	59
Tabela 22: Konstrukcijski sklop notranje stene.....	60
Tabela 23: Konstrukcijski sklop medetažne konstrukcije	60
Tabela 24: Konstrukcijski sklop strehe	60
Tabela 25: Konstrukcijski sklop tal na terenu	61

Tabela 26: Izračun letnih dobitkov in izgub za primer zaprte dvojne fasade s konstantnim prezračevanjem (3 ac/h)-s prezračevanjem v votlini (levo) in brez prezračevanja v votlini (desno)	63
Tabela 27: Izračun letnih dobitkov in izgub za primer zaprte dvojne fasade z računsko metodo prezračevanja-s prezračevanjem v votlini (levo) in brez prezračevanja v votlini (desno)....	64
Tabela 28: Mesečne vrednosti potrebne energije za ogrevanje in hlajenje za modela s prezračevanjem in brez prezračevanja v votlini (računska metoda)	65
Tabela 29: Mesečne vrednosti transmisijskih izgub za model s prezračevanjem v votlini (računska metoda)	66
Tabela 30: Mesečne vrednosti ventilacijskih izgub za model s prezračevanjem v votlini (računska metoda)	66
Tabela 31: Mesečne vrednosti transmisijskih izgub za model brez prezračevanja v votlini (računska metoda)	67
Tabela 32: Mesečne vrednosti ventilacijskih izgub za model brez prezračevanja v votlini (računska metoda)	67
Tabela 33: Izračun letnih dobitkov in izgub za primer odprte dvojne fasade s konstantnim prezračevanjem 3 ac/h (levo) in z računsko metodo prezračevanja (desno).....	70
Tabela 34: Izračun letnih dobitkov in izgub za primer odprte dvojne fasade z rešetkami s konstantnim prezračevanjem 3 ac/h (levo) in računsko metodo prezračevanja (desno)	71
Tabela 35: Izračun dobitkov in izgub za primer modela z enojno fasado s konstantnim prezračevanjem 3 ac/h (levo) in računsko metodo prezračevanja (desno).....	72
Tabela 36: Zaprta dvojna fasada, konstantno prezračevanje s 3 ac/h v votlini in prostorih.....	73
Tabela 37: Zaprta dvojna fasada, brez konstantnega prezračevanja s 3 ac/h v votlini	74
Tabela 38: Zaprta dvojna fasada, prezračevanje z računsko metodo v votlini in prostorih	74
Tabela 39: Zaprta dvojna fasada, brez prezračevanja z računsko metodo v votlini.....	74
Tabela 40: Enojna fasada, konstantno prezračevanje 3 ac/h	75
Tabela 41: Enojna fasada, računski model prezračevanja.....	75

KAZALO SLIK

Slika 1: Energijski razredi	4
Slika 2: Postopek izračuna po SIST EN ISO 13790	11
Slika 3: Mikrolokacija objekta SOP Krško	14
Slika 4: Pogled na objekt iz J smeri.....	14
Slika 5: Prostor izvajanja meritev in analize s programom	15
Slika 6: Merilna oprema (po vrsti: luks meter, IR termometer, multifunkcijski merilni instrument) ...	16
Slika 7: Aero-anemometer TIP: VT 110- VT 115	16
Slika 8: Izvedbe dvojnih fasad upoštevajoč geometrijo: (a) Box Window, (b) Shaft-Box, (c) Corridor and (d) Multi-Storey.....	19
Slika 9: Izvedbe dvojnih fasad upoštevajoč razporeditev odprtín, z leve proti desni po vrsti: Buffer Zone (BZ), Outdoor Air Curtain (OAC), Indoor Air Curtain (IAC), Air Supply (AS) in Air Exhaust (AE).....	20
Slika 10: Buffer sistem, extract air sistem in twin face sistem (po vrsti il leve proti desni)	20
Slika 11: Occidental Chemical/Hooker Building v New Yorku	21
Slika 12: Princip prenosa sevanja v dvojni fasadi	24
Slika 13: a) zavetrna stran in b) privetrna stran.....	26
Slika 14: Južna fasada, severna smer vetra.....	27
Slika 15: Južna fasada, južna smer vetra	28
Slika 16: Južna fasada, vzhodna in zahodna smer vetra.....	28
Slika 17: Južna fasada, brez vetra.....	28
Slika 18: Manitoba Hydro Place.....	33
Slika 19: One Angel Square	34
Slika 20: Auckland's Glittering Green Geyser Office.....	35
Slika 21: Južna in zahodna fasada (levo), severna fasada (desno)	36
Slika 22: Atrij objekta z vidnim platnom za senčenje zgoraj, fontano spodaj in zelenjem	38
Slika 23: Špranje med paneli kaljenega stekla zaradi neprimerne zatesnitve.....	38
Slika 24: Oblačno nebo	42
Slika 25: Pogled na merjeni prostor iz zunanosti (levo) in merjeni prostor (desno)	42

Slika 26: Jasno nebo na dan 29.4.2017	45
Slika 27: Pogled na merjeni prostor iz zunanosti (levo), merjeni prostor (desno) na dan 29.4.2017...	45
Slika 28: Lopute za zajem (levo) in odvod zraka (desno)	47
Slika 29: Prostor za zajem svežega zraka.....	47
Slika 30: Zaprte (levo) in odprte (desno) zgornje lupute na V fasadi	50
Slika 31: Zaprte (levo) in odprte (desno) zgornje lopute na S fasadi	50
Slika 32: DesignBuilder-podatki o lokaciji	56
Slika 33: DesignBuilder-podatki o aktivnosti in notranji projektni temperaturi za ogrevanje in hlajenje	57
Slika 34: DesignBuilder-podatki o HVAC nastavitvah	58
Slika 35: Block 2 s pripadajočimi conami	59
Slika 36: Model z zaprto dvojno fasado.....	62
Slika 37: Preprečitev prezračevanja v votlini.....	62
Slika 38: Računska metoda izračuna prezračevanja v DesignBuilderju	64
Slika 39: Model z odprto dvojno fasado	69
Slika 40: Model z odprto dvojno fasado (z rešetkami za zajem in izpust zraka)	70
Slika 41: Model z enojno fasado	72
Slika 42: 7-stopenjska lestvica Fangerjevega modela toplotnega okolja	73

KAZALO GRAFIKONOV:

Grafikon 1: Prihranek rabe energije za gretje v % (v povprečju 33%).....	30
Grafikon 2: Prihranek energije potrebne za hlajenje v % (v povprečju 28 %).....	31
Grafikon 3: Količina dovedene toplote za različne primere fasad za dosego 20 °C pozimi (levo) in količina odvedene toplote za različne primere fasad za dosego 26 °C poleti (desno)	32
Grafikon 4: Prikaz povprečnih vrednosti hitrosti zraka na dan 14.6.2017 [m/s]	49
Grafikon 5: Prikaz povprečnih vrednosti hitrosti zraka pri odprtih loputah na dan 14.6.2017 [m/s]	52

1 OZADJE PROBLEMA IN NAMEN NALOGE

Živimo v času, ko se pozornost posveča delovanju stavb in njihovi energijski učinkovitosti. Ni več pomembna le izgradnja objekta in njegov izgled, temveč tudi njegov okoljski odziv v celotnem življenjskem ciklusu. Ena od najpomembnejših pravnih listin, ki tudi zakonsko predpisuje energijsko učinkovitost stavbnega fonda je prenovljena Direktiva o energetske učinkovitosti stavb (EPBD 2010/31/EU-Energy Performance of Buildings Directive):

»Med najpomembnejšimi zahtevami prenovljene Direktive o energetske učinkovitosti stavb je prehod na skoraj nič energijsko gradnjo novih stavb. Države članice morajo v svojih nacionalnih zakonodajah opredeliti kriterije za skoraj nič energijsko hišo in nato te kriterije postopoma uvesti v prakso, najprej v javnem sektorju, do leta 2020 pa mora postati skoraj nič energijska gradnja obveza za vse investicije«. (cit. po Šijanec Zavrl, M. 2012. Kakšne so skoraj nič energijske hiše stavbe. EGES)

V skladu z EPBD so zastavljeni cilji podnebno energijske politike EU (tako imenovani 20-20-20 cilji do leta 2020) so: 20 % zmanjšanje emisij CO₂, 20 % povečanje energijske učinkovitosti in 20 % delež obnovljivih virov v energijski bilanci delovanja stavb. Za dosego omenjenih ciljev je treba povečati obseg energijske prenove obstoječih stavb, nove stavbe graditi kot skoraj nič energijske ter zavezati javni sektor k preboju na področju učinkovite rabe energije (URE) in obnovljivih virov energije (OVE) v stavbah [1].

Prenovljena direktiva EPBD uvaja termin skoraj nič energijskih stavb. Gre za stavbe, ki za svoje delovanje (ogrevanje, hlajenje, pripravo tople vode, klimatizacijo in razsvetljavo – zlasti velja za nestanovanjske stavbe) potrebujejo tako malo energije, da jo lahko v pretežni meri pokrijemo z OVE. Tukaj je upoštevana tudi obnovljiva energija, proizvedena na stavbi ali tik poleg nje. V ta namen so države članice zavezane pripraviti nacionalni načrt za povečanje števila gradnje skoraj nič energijskih hiš (Akcijski načrt za skoraj nič-energijske stavbe za obdobje do leta 2020-AN sNES), čigar končni cilj je za vse nove in javne stavbe enoten:

- do 2020 morajo biti vse nove stavbe skoraj nič energijske,
- do 2018 je treba zagotoviti, da bodo vse nove javne stavbe (v lasti ali v najemu) skoraj nič energijske in predstavljajo tudi zgled ostalim.

Bistveni razlog prenovljene direktive EPBD je torej želja po povečanju učinkov prvotne direktive iz leta 2002. Poleg skoraj nič energijskih novogradenj, želi namreč tudi povečati obseg energijske prenove starejših stavb. Pričakovani rezultati prenovljene direktive EPBD so 5 % do 6 % zmanjšanje končne

energije EU, 160 Mt – 210 Mt na leto prihrankov CO₂ in 280.000 do 450.000 novih delovnih mest do leta 2020 [2].

V predlogu o spremembah direktive EPBD 2010/31/EU je že v prvem poglavju, kjer je predstavljena vsebina direktive, izključno navedeno, da boljše izvedbe zgradb zagotavljajo višjo stopnjo udobja in dobrega počutja za svoje stanovalce in izboljšujejo zdravje z zmanjševanjem umrljivosti in obolevnosti zaradi slabega notranjega okolja. Navedeno je tudi, da ustrezno ogrevana in prezračevana stanovanja blažijo negativne vplive na zdravje, ki jih povzroča vlažnost, zlasti med ranljivimi skupinami, kot so otroci in starejši ter osebe z že obstoječimi boleznimi [3].

Z namenom dosega visoko energijsko učinkovitih stavb je potrebno izvesti načrtovanje objektov, ki sledi bioklimatskim načelom: lokacija-ovoj-sistemi-uporabnik. Slednje pa naj bo podprto z uvedbo PSA. Dvojne fasade predstavljajo bioklimatski ukrep vpeljan že v začetku 20. stoletja (glej poglavje 5.1 Zgodovina dvojnih fasad). Prvi primer dvojne fasade v Sloveniji predstavlja stavba SOP Krško, zgrajena leta 1987. Nepremišljeno načrtovanje, napake v tehnologiji, pogosto vodijo k poslabšanju notranjega okolja in k energijski neučinkovitosti.

Namen dela je na konkretnem primeru stavbe-SOP Krško, analizirati delovanje dvojne fasade z vidika energijske učinkovitosti in notranjega udobja. Za uvodnim poglavjem, bo sledilo drugo poglavje, kjer so navedeni cilji in hipoteze magistrske naloge. Tretje poglavje predstavlja zakonodajne osnove z naborom kriterijev učinkovite rabe energije in udobja. Bazo predstavljata Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah-PURES (Ur. l. RS, št 52/2010) in Gradbeni zakon (Ur. l. RS, št. 61/2017), v pomoč pa nam je bila tudi Tehnična smernica TSG-1-004:2010 (Učinkovita raba energije) in Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Ur. l. RS, št. 42/02, 105/02, 110/02 – ZGO-1 in 61/17 – GZ). Sledi četrto poglavje, metoda, kjer je na kratko opisana merilna oprema in merilni prostor samega objekta. V petem poglavju smo se dotaknili stavb z dvojno fasado in s pomočjo raziskav na tem področju poskusili predstaviti koncept njihovega delovanja. Temu sledi opis našega objekta in težav do katerih prihaja na njem, ter iskanje razlogov za slednje. Sedmo poglavje predstavlja meritve na konkretnem objektu. Osredotočili smo se na meritve osvetljenosti prostora, hitrosti gibanja zraka in parametre toplotnega udobja, saj so le-te bistvene za učinkovito delovanje samega objekta. Tako pridemo do osmega poglavja, kjer je predstavljen računalniški program DesignBuilder, s pomočjo katerega smo poskusili predstaviti dejansko stanje in analizirati energetska učinkovitost objekta in udobja z uporabo različnih modelov in nastavitev. Dobljene vrednosti smo primerjali z zakonodajo in podali ukrepe za izboljšanje delovanja dvojne fasade. Na koncu, v devetem poglavju, smo podali še zaključke do katerih smo prišli v nalogi.

2 CILJI IN HIPOTEZE

Pred začetkom same magistrske naloge smo določili cilje. Cilji so:

- opraviti sistematični pregled raziskav o delovanju dvojnih fasad z vidika rabe energije in kakovosti notranjega okolja,
- izvesti meritve izbranih parametrov kakovosti notranjega okolja in parametrov gradbene fizike na konkretnem objektu,
- izvesti simulacijo rabe energije in udobja na treh različnih variantah stavbnega ovoja (z zaprto dvojno fasado, z odprto dvojno fasado, brez dvojne fasade-samo en stavbni ovoj) na modelu testne stavbe s pomočjo programskega orodja DesignBuilder,
- primerjati simulirane vrednosti z zakonskimi priporočili in ugotoviti ali ustrezajo zahtevanim vrednostim, na osnovi ugotovitev izdelati ukrepe za izboljšavo (opisno).

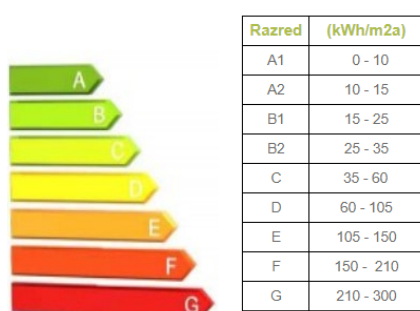
S pomočjo ciljev smo si zastavili naslednje hipoteze:

- primerjava med rezultati pregledanih raziskav in analizo dejanskega stanja na objektu bo pokazala, da dvojna fasada stavbe SOP Krško ni pravilno zasnovana in ni vzdrževana,
- izmerjene vrednosti parametrov v stavbi SOP Krško (hitrost gibanja zraka v prezračevalni votlini, osvetljenost prostora, parametri toplotnega udobja) ne bodo dosegle zakonsko predpisanih in priporočenih vrednosti,
- izračun rabe energije bo pokazal, da model dvojne fasade zniža rabo energije za hlajenje poleti (v kolikor je prisotno prezračevanje v votlini) v primerjavi z modelom kjer ni prezračevanja v votlini in da model dvojne fasade prav tako zniža rabo energije za ogrevanje pozimi (v kolikor v votlini ni prezračevanja in se zrak v njej predgreje), v primerjavi z modelom kjer je prisotno prezračevanje v votlini pozimi,
- programsko orodje DesignBuilder je primerno za modeliranje objektov z dvojno fasado,
- trenutno zasnovana stavba ima težave s pregrevanjem v poletnih mesecih in preveliki rabi energije za hlajenje, prav tako pa ima zaradi slabšega stavbnega ovoja težave tudi s preveliko rabo energije za ogrevanje pozimi, zato stavba ne bo ustrezala zakonskim zahtevam in priporočilom.

3 TEORETIČNE OSNOVE IN ZAKONODAJA

3.1 Splošno

Razredi energetske učinkovitosti, kakor tudi sami robni pogoji izračuna, so med seboj glede na EU zelo različno določeni. Zato je neposredna primerljivost razredov in energijskih indikatorjev med državami znotraj EU praktično nemogoča. Energijski razredi ali energijski kazalniki v Sloveniji so prikazani na spodnji sliki.



Slika 1: Energijski razredi [4]

Razreda A in B se pripisujeta pasivnim oz. skoraj nič-energijskim stavbam. Nizkoenergijske hiše se gibljejo v mejah od 15 do 35 kWh/(m²a). Treba pa je dodati, da so razredi energetske učinkovitosti določene samo glede na letno potrebo toplote za ogrevanje stavbe na enoto uporabne površine. Merilo za energijsko učinkovitost stavbe pa predstavlja izključno celotna raba energije. Tukaj torej ni mišljena le energija za ogrevanje, ampak tudi za hlajenje, klimatizacijo in pripravo tople vode (vgrajena razsvetljava naj se upošteva predvsem pri nestanovanjskih stavbah), in sicer na ravni primarne energije ter s tem povezanih emisij CO₂ [4].

V Akcijskem načrtu za skoraj nič-energijske stavbe za obdobje do leta 2020 (AN sNES) so predvidene največje dovoljene vrednosti za letno količino primarne energije in najmanjši delež OVE glede na vrsto stavbe.

Tabela 1: Največje dovoljene vrednosti primarne energije za skoraj nič-energijske glede na vrsto stavb v RS [kWh/m²] [5]

Vrsta stavbe	Največja dovoljena vrednost primarne energije na enoto kondicionirane ¹⁾ površine na leto (kWh/m²a)		Minimalni delež OVE [%]
	Novogradnja	Večja prenova ¹⁾ (rekonstrukcija)	
Enostanovanjske stavbe	75	95	50
Večstanovanjske stavbe	80	90	50
Nestanovanjske stavbe*	55	65	50

* na podlagi analize stroškovno optimalnih ravni za pisarniške stavbe kot najmočnejše zastopano skupino nestanovanjskih stavb; izjeme za druge vrste nestanovanjskih stavb bo opredelil predpis, ki ureja učinkovito rabo energije v stavbah

** RER je delež obnovljivih virov glede na skupno dovedeno energijo¹⁸¹⁹

3.2 Pravilnik o učinkoviti rabi energije

Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah ali PURES, Ur. l. RS, št 52/2010, je bil sprejet 22.6.2010, v veljavo pa je stopil z 1.7.2010. Ta pravilnik določa tehnične zahteve, ki morajo biti izpolnjene za učinkovito rabo energije v stavbah na področju toplotne zaščite, ogrevanja, hlajenja, prezračevanja ali njihove kombinacije, priprave tople vode in razsvetljave v stavbah, zagotavljanja lastnih obnovljivih virov energije za delovanje sistemov v stavbi ter metodologijo za izračun energijskih lastnosti stavbe.

Ta pravilnik se uporablja pri gradnji novih stavb in rekonstrukciji stavbe oziroma njenega posameznega dela, kjer se posega v najmanj 25 odstotkov površine toplotnega ovoja. Pri rekonstrukciji stavbe, oziroma njenega posameznega dela, kjer se posega v manj kot 25 odstotkov površine toplotnega ovoja stavbe, oziroma njenega posameznega dela, morajo biti dela izvedena tako, da so izpolnjene zahteve glede toplotne prehodnosti iz tehnične smernice za graditev TSG-1-004:2010 Učinkovita raba energije [6].

Tabela 2: Ključni členi PURES-a Ur. l. RS, št 52/2010 [6]

Številka člena	Vsebina člena	Opis vsebine člena (zahteve, ki so pomembne za nas)
6	Robni pogoji	Pri zagotavljanju učinkovite rabe energije v stavbah je treba upoštevati celotno življenjsko dobo stavbe, njeno namembnost, podnebne podatke, materiale konstrukcije in ovoja, lego in orientiranost, parametre notranjega okolja, vgrajene sisteme in naprave ter rabo obnovljivih virov energije.
7	Mejne vrednosti učinkovite rabe energije	Energijska učinkovitost stavbe je dosežena, če so izpolnjeni naslednji pogoji: 1. koeficient specifičnih transmisijskih toplotnih izgub skozi površino toplotnega ovoja stavbe, določen z izrazom H'_T (W/m^2K) = H_T/A, ne presega: $H'_T = \frac{H_T}{A} \leq 0,28 + \frac{T_L}{300} + \frac{0,04}{f_o} + \frac{z}{4}$ Kjer predstavlja z brezdimenzijsko razmerje med površino oken (gradbena odprtina) in površino toplotnega ovoja stavbe.

		2. dovoljena letna potrebna toplota za ogrevanje Q_{NH} stavbe, preračunana na enoto kondicionirane površine A_u oziroma prostornine V_e stavbe, ne presega: - za nestanovanjske (poslovne) stavbe: $Q_{NH} / V_e \leq 0,32 (45 + 60 f_0 - 4,4 T_L) \text{ (kWh/(m}^3\text{a))}$ 3. dovoljen letni potreben hlad za hlajenje $Q(NC)$ stavbe, preračunan na enoto hlajene površine stavbe $A(u)$, ne presega: - za stanovanjske stavbe: $Q_{NC}/A_u \leq 50 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ 4. letna primarna energija za delovanje sistemov v stavbi $Q(p)$, preračunana na enoto ogrevane površine stavbe A_u, ne presega: - za stanovanjske stavbe: $Q_p/A_u = 200 + 1,1 (60 f_0 - 4,4 T_L) \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ Iz tehnične smernice TSG-1-004:2010 ne smejo biti presežene sledeče vrednosti toplotnih prehodnosti: - zunanje stene in stene proti neogrevanim prostorom: $U_{max}=0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$ - tla na terenu: $U_{max}=0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$ - strop proti neogrevanemu prostoru, stropi v sestavi ravnih ali poševnih streh: $U_{max}=0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$
9	Toplotna zaščita	S toplotno zaščito površine toplotnega ovoja stavbe in ločilnih elementov delov stavbe z različnimi režimi notranjega toplotnega ugodja je treba: - zmanjšati prehod energije skozi površino toplotnega ovoja stavbe - zmanjšati podhlajevanje ali pregrevanje stavbe - nadzorovati (uravnavati) zrakotesnost stavbe

10	Ogrevanje	Projektirani in izvedeni sistem ogrevanja stavbe mora ob najmanjših toplotnih izgubah zagotoviti takšno raven notranjega toplotnega ugodja, kot je določena s predpisi, ki urejajo prezračevanje in klimatizacijo stavb, oziroma je določena v projektni nalogi, če je ta strožja od predpisane
11	Hlajenje	(1) S projektiranjem in vgradnjo pasivnih gradbenih elementov je treba zagotoviti, da se tudi v času sončnega obsevanja in visokih zunanjih temperatur zraka prostori v stavbi zaradi sončnega obsevanja ne pregrejejo bolj, kot je določeno za temperaturo zraka v skladu s predpisom, ki ureja prezračevanje in klimatizacijo stavb (2) Če z uporabo rešitev iz prejšnjega odstavka v stavbi ni mogoče zagotoviti predpisanega toplotnega ugodja, se sme projektirati in izvesti sistem intenzivnega nočnega hlajenja oziroma prezračevanja stavb in druge alternativne rešitve (3) Če z uporabo rešitev iz prvega in drugega odstavka tega člena v stavbi ni mogoče zagotoviti predpisanega toplotnega ugodja, se sme projektirati in izvesti sistem za hlajenje stavbe
14	Razsvetljava	Učinkovita raba energije za razsvetljavo se zagotavlja z naravno osvetlitvijo, če to ni mogoče, pa je treba uporabiti energijsko učinkovita svetila in pripadajoče elemente ter ustrezno regulacijo. Pri tem je treba upoštevati tudi velikosti prostora in število njegovih uporabnikov.
16	Obnovljivi viri energije (OVE)	(1) Energijska učinkovitost stavbe je dosežena, če je poleg zahtev iz 7. člena tega pravilnika najmanj 25 odstotkov celotne končne energije za delovanje sistemov v stavbi zagotovljeno z rabo obnovljivih virov energije v stavbi. (2) Energijska učinkovitost stavbe je dosežena tudi, če je delež končne energije za ogrevanje in hlajenje stavbe ter pripravo tople vode pridobljen iz najmanj 25 odstotkov sončnega obsevanja

		(3) Šteje se, da je energijska učinkovitost stavbe dosežena, če je dovoljena letna potrebna toplota za ogrevanje stavbe, preračunana na enoto kondicionirane površine, oziroma površino stavbe, za najmanj 30 odstotkov nižja od mejne vrednosti iz 7. člena
--	--	--

3.3 Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb

Tabela 3: Ključni členi Pravilnika o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Ur. l. RS, št. 42/02, 105/02, 110/02 – ZGO-1 in 61/17 – GZ)

Številka člena	Vsebina člena	Opis vsebine člena
11	Toplotno okolje	(1) Če obleka in aktivnost nista opredeljeni, znašata vrednosti za obleko v povprečju 0,5 clo (0,078 m² K/W) v času brez ogrevanja (letnem) in 1,0 clo (0,155 m² K/W) v ogrevalnem (zimskem) obdobju pri aktivnosti 1,2 met (sedenje). (2) Toplotno okolje mora biti tako, da je indeks PPD manjši od 15 %, indeks PMV pa v mejah $-0,7 < PMV < +0,7$
Priloga 1	Parametri načrtovanja	V posamičnih pisarnah, oz. pisarnah za več ljudi, mora biti občutena temperatura poleti 24,5°C ± 2,5°C, pozimi pa 22°C ± 3°C

3.4 Gradbeni zakon

Ta zakon ureja pogoje za graditev objektov in druga vprašanja, povezana z graditvijo objektov. Sprejet je bil 24.10.2017, v veljavo pa je stopil 17.11.2017. Omenjeni zakon se bo začel uporabljati 1.6.2018 [7]

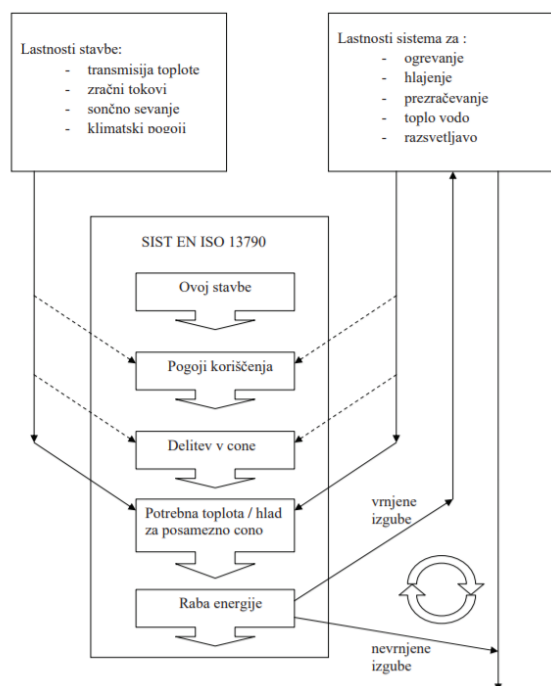
Tabela 4: Ključni členi Gradbenega zakona Ur. l. RS, št. 61/2017 [7]

Številka člena	Vsebina člena	Opis vsebine člena (zahteve, ki so pomembne za nas)
18	Higienska in zdravstvena zaščita ter zaščita okolja	(1) V objektih je treba zagotoviti higiensko in zdravstveno zaščito. Objekti ne smejo ogrožati zdravja ljudi ali povzročiti čezmerne obremenitve okolja. (2) Objekti in deli objektov morajo zagotavljati, da je onesnaževanje notranjega in zunanjega zraka čim manjše in ne presega predpisanih mejnih vrednosti. (4) Vse prostore v objektih, dostopne ljudem, je treba osvetliti v skladu z njihovo namembnostjo. Prostori, v katerih se dalj časa zadržujejo ljudje, morajo biti osvetljeni z naravno svetlobo, ki je zadostna z vidika zdravja in dobrega počutja. Če primerna naravna osvetlitev ni tehnično izvedljiva, se lahko prostori druge namembnosti osvetlijo tudi z umetno razsvetljavo. (5) V objektih je treba zagotoviti notranje ugodje in kakovost zraka. Prezračevalni in klimatizacijski sistemi ne smejo ogrožati zdravja ljudi. (7) Objekte je treba ščititi pred neželeno vlago. Preprečiti je treba škodljivo nabiranje vlage zaradi kondenzacije vodne pare v gradbenih elementih objektov in na njihovih površinah.
21	Varčevanje z energijo, ohranjanje toplote in raba obnovljivih virov energije	(1) Objekti morajo zaradi varčevanja z energijo in ohranjanja toplote ter čim večje rabe obnovljivih virov energije zagotavljati učinkovito rabo energije in rabo obnovljivih virov energije na področju toplotne zaščite, ogrevanja, hlajenja, prezračevanja ali njihove kombinacije, priprave tople vode in razsvetljave v stavbah ter drugih tehničnih sistemov, povezanih s sistemi stavbe. Čim večji del energije za delovanje sistemov v stavbi mora biti zagotovljen iz obnovljivih virov energije.

		(2) Objekt mora biti ustrezno orientiran in zasnovan z ugodnim razmerjem med površino toplotnega ovoja stavbe in njegovo kondicionirano prostornino. Z materiali in elementi konstrukcije ter celotno zunanjo površino objekta mora biti omogočeno učinkovito upravljanje energijskih tokov. (3) Sistem ogrevanja mora ob najmanjših toplotnih izgubah zagotoviti ustrezno raven notranjega toplotnega ugodja. (4) S pasivnimi gradbenimi elementi je treba zagotoviti, da se v času sončnega obsevanja in hkratnih visokih zunanjih temperaturah zraka, prostori v objektu zaradi sončnega obsevanja ne pregrejejo. Če s temi rešitvami v objektu ni mogoče zagotoviti predpisanega toplotnega ugodja, se uporabijo sistemi intenzivnega nočnega hlajenja, oziroma prezračevanja prostorov in druge alternativne rešitve. Če z uporabo teh pristopov ni mogoče zagotoviti predpisanega toplotnega ugodja, se uporabi sistem za hlajenje stavbe. (5) Če z naravnim prezračevanjem v prostorih ni mogoče doseči predpisane kakovosti zraka, se uporabi sistem hibridnega ali mehanskega prezračevanja, ki mora omogočati učinkovito vračanje toplote zraka.
--	--	--

3.5 Izračun potrebne energije za ogrevanje in hlajenje stavbe

Letno potrebno energijo za ogrevanje in hlajenje stavbe program DesignBuilder računa po standardu SIST EN ISO 13790: 2008. Pri izračunu se uporablja mesečna računska metoda. Računski postopek je prikazan na spodnji sliki.



Slika 2: Postopek izračuna po SIST EN ISO 13790 [8]

Potrebno energijo za ogrevanje/hlajenje določimo na osnovi toplotne bilance na nivoju cone. Načeloma je energija za ogrevanje razlika med toplotnimi izgubami in toplotnimi dobitki, pomnožena s faktorjem izkoristka. Toplotne dobitke predstavljajo notranji toplotni dobitki (sproščena toplota, ki jo oddajajo ljudje, naprave in razsvetljava v stavbi in njen vir ni ogrevalni sistem) in zunanji toplotni dobitki (dobitki zaradi sončnega sevanja). Toplotne izgube pa delimo na transmisijske (toplotne izgube zaradi prehoda toplote skozi ovoj stavbe) in prezračevalne (toplotne izgube zaradi izmenjave odtočnega zraka iz prostorov z zunanjim zrakom). Upoštevajoč samo senzibilno toploto so v izračunu upoštevani:

- transmisijski toplotni tokovi med cono in zunanjim okoljem stavbe,
- ventilacijski toplotni tokovi med cono in zunanjim zrakom,
- transmisijski in ventilacijski toplotni tokovi med posameznimi conami,
- notranji toplotni dobitki/izgube,
- zunanji toplotni dobitki tako skozi zastekljene površine, kot tudi skozi ostale elemente gradbene konstrukcije,
- akumulacija toplote zaradi mase stavbe,
- potrebna energija za ogrevanje – dovedena toplota za vzdrževanje minimalne temperature ogrevanja v coni,
- potrebna energija za hlajenje – odvedena toplota za vzdrževanje maksimalne temperature hlajenja v coni.

Zato so glavni vhodni podatki za sam izračun slednji:

- transmisijske in ventilacijske lastnosti,
- toplotni dobitki notranjih virov, lastnosti glede sončnega sevanja-pomembni meteorološki podatki,
- opis stavbe in način koriščenja prostorov,
- zahteve za toplotno udobje (temperatura, izmenjava zraka),
- lastnosti sistemov za ogrevanje, hlajenje, prezračevanje, razsvetljavo, pripravo tople vode,
- izgube energije. [8]

Natančnejši postopek izračuna s programskim orodjem DesignBuilder je opisan v članku Parametric study of double-skin facades performance in mild climate countries, objavljen v Journal of Building Engineering 12 (2017), avtorji André Albert, Nuno M.M. Ramos, Ricardo M.S.F. Almeida, vendar pa se v tej nalogi ne bomo poglobljali v ozadje in matematične algoritme samega izračuna, saj to ni njen namen.

4 METODA

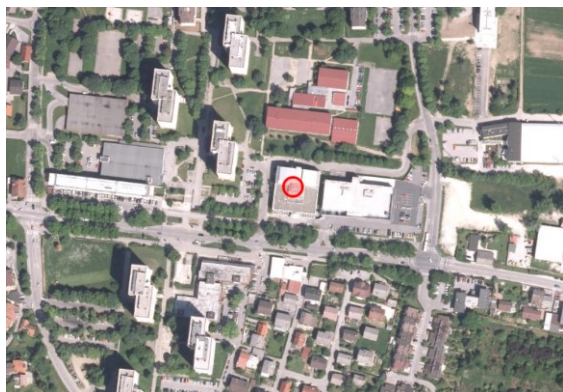
4.1 Pregled literature

Sistematični pregled literature smo izvedli s pomočjo strokovnih člankov poiskanih v bazah podatkov Science Direct, Google Search, Cobiss. Iskali smo pod ključnimi besedami v slovenščini »dvojna fasada«, »energijska učinkovitost dvojnih fasad«, »naravno prezračevanje«, »vzgonski učinek v dvojnih fasadah«, »toplotno udobje« idr. in ključnimi besedami v angleščini »double skin facade«, »natural ventilation in double skin facade«, »energy performance of double skin facade«, »heat transfer in double skin facade«, »thermal performance«, »energy efficiency«, »best practice for double skin facade«, »natural cooling« idr..

Kriterije smo definirali na osnovi pregleda mednarodne in nacionalne zakonodaje: EPBD direktiva, pravilnik PURES, Gradbeni zakon, Tehnična smernica TSG-1-004:2010, Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb in standarda Svetloba in razsvetljava SIST EN 12464-1:2011. V strokovnih delih (npr. revija EGES (področje graditeljstvo)) ter številnih spletnih straneh o energijski učinkovitosti in energetskih izkazih stavb, smo se seznanili z vrednostmi rabe energije in izpustov, ter pogledali v prihodnost na področju učinkovite rabe energije v stavbah.

4.2 Opis obravnavanega objekta

Izbrana stavba je stavba SOP Krško. Gre za prvi primer »*double skina*«, oz. dvojne fasade pri nas v Sloveniji. Načrtovana namembnost je pisarniška stavba, nestanovanjska stavba. Od leta 2012 ne obratuje. Locirana je na Litijski cesti 51 v Ljubljani. Stavba je pravokotne oblike. Južna vhodna fasada je obrnjena proti Litijski cesti, s cesto ju ločuje zelenica z drevoredom. Ob neposredni bližini vzhodne fasade je postavljen trgovski objekt Lidl. Mikrolokacija objekta je prikazana na spodnji sliki 3. Več o sami stavbi je opisano v šestem poglavju.



Slika 3: Mikrolokacija objekta SOP Krško [9]



Slika 4: Pogled na objekt iz J smeri [10]

4.3 Izbran prostor za izvedbo meritev

Meritve (osvetljenosti, hrupa, temperature, vlage, hitrosti gibanja zraka v prezračevalni votlini) smo izvajali v pritličju zgoraj omenjene stavbe. Prostor v katerem smo izvajali meritve je dolg 8,4 m, širok 6,6 m in visok 3 m (55 m^2 , 166 m^3). Gre za pisarniški prostor, orientiran proti JZ. J in Z fasadi sta zunanji, V in S pa notranji. Notranja fasada je zastekljena z enostavnimi dvoslojnimi okni z lesenim okvirjem s toplotno prehodnostjo $1,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, zunanja pa s kaljenim steklom s toplotno prehodnostjo $10,185 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. V času izvajanja meritev je bil prostor prazen in ni bil v uporabi. V omenjenem prostoru smo izvedli meritve osvetljenosti, hitrosti gibanja zraka v prezračevalni votlini (ob omenjenem prostoru in na ostalih merilnih mestih okrog objekta) temperature zraka, ravni hrupa. Dodati je treba, da so bila okna v času izvajanja meritev umazana, na zgornjem delu okenskega okvirja tik pod stropom so bile pribite deske, pred objektom pa je bilo tudi bujno grmičevje, kar je vplivalo na rezultate meritev. Natančnejši podatki o lastnostih konstrukcijskih sklopov so opisane v poglavju 8.2, z naslovom Vhodni podatki za analizo.



Slika 5: Prostor izvajanja meritev in analize s programom

4.4 Uporabljena merilna oprema

Meritve smo izvajali s sledečo merilno opremo:

- LT 40 luks meter za meritev osvetljenosti: meri do vrednosti 400.000 lx, oz. 40.000 Fc (foot candelas), do 3 % odstopanje.
- Infrardeči termometer IR 900-30S meri temperaturo površine. Senzor na napravi izmeri oddano (emitirano), odbito (reflektirano) in prepuščeno (transmitirano) sevano toploto elementa in na podlagi tega izračuna temperaturo. Naprava omogoča spreminjanje vrednosti emisivnosti materialov in tako podaja natančnejše rezultate. Meri od -50 do 900°C. Odstopanje naprave do 3,5 °C med -50 in +20°C ter 1,5°C pri temperaturah nad 20°C.
- Multifunkcijska merilna naprava Voltcraft VC 4 in 1 meri osvetljenost (do 20.000 lx), temperaturo zraka (-20 do 750°C, relativno vlago (25 do 95%), raven hrupa (35 do 130 dB). Odstopanje naprave do 5% pri osvetljenosti, do 3,5%, oz. 2°C pri meritvi temperature, do 3,5 dB pri 94 dB pri meritvi ravni hrupa in do 5% pri meritvi relativne vlažnosti zraka (pri 25°C in vlagi med 35 in 95%).



Slika 6: Merilna oprema (po vrsti: luks meter, IR termometer, multifunkcijski merilni instrument)

- Merilnik TIP VT 110 (proizvajalec KIMO instruments). Merilnik omogoča meritve hitrosti zraka, zračnega toka in temperature zraka. Žička se segreva kontinuirano glede na temperaturo zraka in se hladi z gibanjem zraka, temperaturo, ki se nam prikaže na zaslonu pa vzdržuje regulator. Meri hitrost zraka od 0,15 m/s do 30 m/s, odstopanje $\pm 3\%$). Delovna temperatura anemometra je od 0 do $\pm 50^{\circ}\text{C}$.



Slika 7: Aero-anemometer TIP: VT 110- VT 115

Natančnejši opis meritev in rezultatov samih meritev je opisan v osmem poglavju te naloge. Zakonske zahteve in priporočila smo definirali iz PURES-a, Tehnične smernice TSG-1-004:2010, Pravilnika o prezračevanju in klimatizaciji stavb in standarda Svetloba in razsvetljava SIST EN 12464-1.

5 STAVBE Z DVOJNO FASADO

5.1 Zgodovina dvojnih fasad

Osnovni koncept dvojne fasade je prvič raziskal in testiral švicarsko-francoski arhitekt Le Corbusier že v začetku 20. stoletja. Njegova zamisel, ki jo je imenoval »mur neutralisant« ali nevtralizirajoča stena, je vključevala vstavljanje ogrevalnih/hladilnih cevi med plasti stekla. Tak sistem je apliciral na svoji vili, po imenu Villa Schwob (La Chaux-de-Fonds, Švica, 1916), in ga predlagal za številne druge projekte, vključno z natečajem Lige Narodov leta 1927, stavbo Centrosoyuz (Moskva, 1928-33) in Cité du Refuge (Pariz, 1930). Ameriški inženirji, ki so leta 1930 preučevali sistem, so Le Corbusiera obvestili, da bo porabil veliko več energije kot s sistemom klasične prezračevane stene, oz. fasade, vendar je Harvey Bryan kasneje zaključil, da ima zamisel Le Corbusiera prednosti, v kolikor je upoštevano ogrevanje s pomočjo sončne energije.

Še en zgodnji eksperiment dvojne fasade je bila hiša Alfreda Loomisa, arhitekta Williama Lescazea iz leta 1937 v Tuxedo Parku v New Yorku. Hiša je imela zapleten dizajn »dvojne ovojnice« z zračnim prostorom širine 60 cm, kondicioniranim s sistemom, ločenim od hiše same. Cilj je bil vzdrževati visoko stopnjo vlažnosti znotraj.

Eden od prvih sodobnih primerov dvojne fasade je Occidental Chemical Building (Niagarski slapovi, New York, 1980). Stavba, v bistvu steklena kocka, je imela 120 cm votlino med plastmi stekla, ki je služila za predgrevanje zraka v zimskih mesecih.

Nedavna ponovna oživitev učinkovite zasnove stavbe, z vidika dvojne fasade, je znova poudarila zanimanje za ta koncept. Ker USGBC (U.S. Green Building Council), med drugim ustanovitelj LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) certifikata za zelene stavbe, nagrajuje s posebnimi točkami za zmanjšanje rabe energije v stavbah z modernim arhitekturnim stavbnim ovojem v primerjavi z osnovnimi primeri konvencionalnih fasad, se ta strategija uporablja za optimizacijo energijske učinkovitosti stavb [11].

Danes je na svetu kar nekaj objektov z dvojno stekleno fasado, ki učinkovito funkcionirajo in so lahko drugim objektom za zgled. Stavbe kot so Manitoba Hydro Place v Kanadi, One Angel Square v Manchesteru in Auckland's Glittering Green Geyser Office v Aucklandu so samo nekateri izmed mnogih primerov. Slednje so natančneje opisane v poglavju 5.13, z naslovom Primeri dobre praks.

5.2 Splošno

Dvojna fasada postaja v zadnjih letih ena izmed najbolj popularnih izvedb t.i. pasivno solarne arhitekture. Med pasivne objekte spadajo objekti, kjer je notranje okolje v stavbi regulirano s pomočjo strukture in arhitekturnega oblikovanja stavb (orientacija stavbe, razmerja transparentnih in netransparentnih površin, vrste zasteklitve, senčil, itd.) in brez pomoči mehanskega gretja in hlajenja. Povod za izvedbo dvojnih fasad je želja po oblikovanju stavbe, ki bo ob modernem izgledu s transparentno-stekleno fasado delovala energijsko učinkovito [12].

Osnovna prednost dvojnih fasad je torej, poleg estetskih razlogov, velika količina naravne svetlobe zaradi velikih transparentnih površin. Seveda pa zaradi tega prihaja do izgube toplote pozimi in pregrevanja v poletnih mesecih. Ravno zato je dvojna fasada zasnovana tako, da se s pomočjo naravnega prezračevanja zmanjša pregrevanje. To se dosega bodisi s termičnim vzgonskim učinkom, bodisi s pomočjo vetra.

Zasnovana je bila na ideji o fasadi, oz. zunanji steni, ki bi se dinamično odzivala na spremenljive zunanje vplive. Predhodnik dvojne fasade je t.i. Trombov zid, kot zanimiv primer pasivno solarne arhitekture. Sistem absorbira sončne žarke podobno kot sončni kolektor in se uporablja za ogrevanje stavb kot so npr. pasivne hiše. Deluje na učinku tople grede, kratkovalovni sončni žarki lahko prodrejo skozi stekleni del in se absorbirajo v absorpcijsko maso. Odbite dolgovalovne žarke pa ustavi steklo in ta toplota se potem počasi sprošča in ogreva prostor v večernih urah. In ravno na tem principu funkcionira dvojna steklena fasada v zimskih mesecih [13].

Delovanja dvojne fasade bi lahko razdelili v 2 režima, in sicer:

- **Zimski režim, oz. ogrevanje**

Gre za to, da sonce posije na steklo in ga segreje (kratkovalovno sevanje prodre skozi zasteklitve, dolgovalovno sevanje, oz. toplota pa ostane ujeta znotraj), pri tem pa se zaradi sevanja toplega zraka nabira v medprostoru in tako ogreva notranjo fasado in posledično notranje prostore. Dvojna fasada zmanjšuje izgubo toplote tako, da z zmanjšanjem hitrosti pretoka zraka (zaprte lopute) in zvišanjem temperature zraka v kanalu, zmanjša stopnjo prenosa toplote na površini stekla. Tako se na notranji površini stekla zadržuje višja temperatura, ki ogreva notranji prostor. Z uporabo različnih spektralno selektivnih premazov za zasteklitve pa lahko zelo manipuliramo z absorpcijo in refleksijo toplote in dosežemo boljše delovanje dvojne fasade [14].

- **Poletni režim, oz. hlajenje**

V tem primeru vlek svežega zraka skozi kanal ohladi notranjo fasado z naravnim (s pomočjo termičnega vzgona) ali mehanskim (s pomočjo raznih ventilatorjev in drugih naprav)

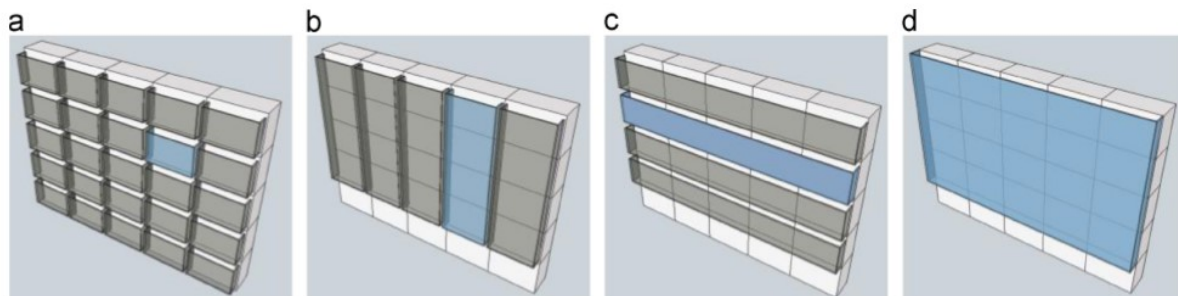
prezračevanjem, oziroma s pomočjo odprtín v notranji fasadi odvaja topel zrak iz notranjih prostorov. Poleg tega se lahko uporablja tudi nočno hlajenje s prezračevanjem [14].

Dvojna fasada se vse bolj aplicira v novejših, predvsem poslovnih objektih, ki želijo s svojim videzom in ekološkim delovanjem biti zgled ostalim stavbam. Je pa dejstvo, da so klasičnim arhitektom te stavbe še vedno neznanka. Se pa mnogokrat poraja vprašanje ali so te stavbe res okolju bolj prijazne in obstojne ter ali se jih sploh splača graditi. Dvojna fasada ima namreč tudi nekaj slabih lastnosti, med drugim cena izvedbe, konstrukcija same fasade in vzdrževanje je dražje od navadnih fasad, povečana teža same konstrukcije, prenos zvoka po prezračevalnem kanalu, požarna varnost, zaradi fasade se ustrezno zmanjša uporabna površina pisarn, itd. [12].

5.3 Delitev dvojnih fasad

Dvojna fasada je dokaj kompleksen arhitekturni koncept, ki je klasificiran po treh osnovnih parametrih, in sicer: vrsti prezračevanja, geometriji votline in smeri pretoka zraka v votlini [15].

Prezračevanje delimo na naravno, mehansko in kombinirano, oz. hibridno. Upoštevajoč geometrijo, delimo objekte z dvojno fasado v 4 osnovne skupine, in sicer: Box-Window, Corridor, Shaft-Box in Multi-Storey.

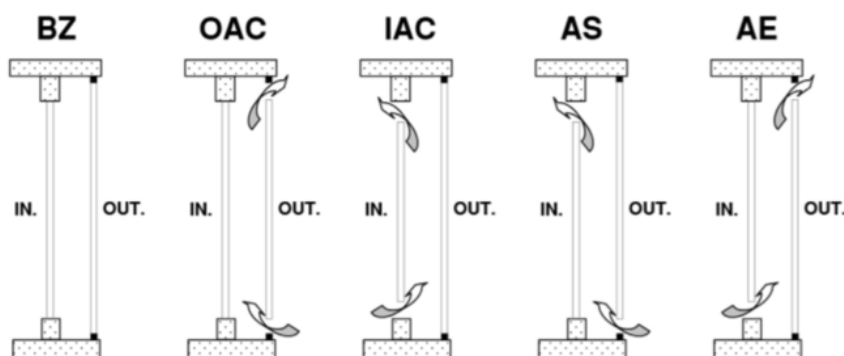


Slika 8: Izvedbe dvojnih fasad upoštevajoč geometrijo: (a) Box Window, (b) Shaft-Box, (c) Corridor and (d) Multi-Storey [16]

Prezračevalni kanal lahko poteka neprekinjeno po celotni višini objekta (naš objekt), lahko je razdeljen po etažah (po navedbi [16] je najboljše za požarno varnost), oz. je razdeljen vertikalno po odsekih za doseg boljšega dimniškega efekta. V primeru a (*box window*) je kanal razdeljen vertikalno in horizontalno. Okna na notranji fasadi so lahko delujoča za potrebe naravnega prezračevanja. V b primeru (*shaft-box*) je kanal razdeljen samo vertikalno in poteka od tal do vrha. Izvedba zahteva manj odprtín v zunanji fasadi, kar ugodno vpliva na zvočno izolativnost objekta. V c primeru (*corridor*) je kanal razdeljen samo horizontalno. Paziti je treba na prenos zvoka iz prostora v prostor, vendar je ta sistem po navedbi [16] ugoden z vidika požarne varnosti. V d primeru (*multi-storey*) kanal ni razdeljen ne vertikalno in ne horizontalno, temveč poteka po celotni višini. Tak sistem je na našem objektu. Prav

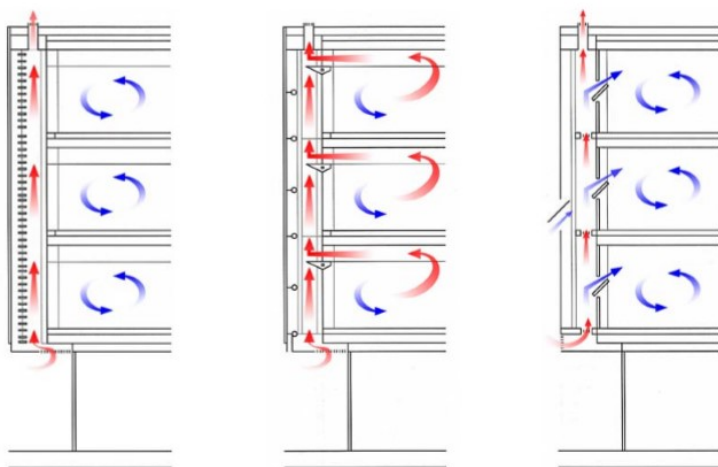
pride v območjih kjer je veliko zunanjskega hrupa. V našem primeru temu ni tako. Cesta je sicer blizu, a je promet relativno umirjen in ne povzroča prevelikega hrupa. Primera b in d naj bi bila vsaj z vidika dobrega prezračevanja zaradi velike višinske razlike najugodnejša. Z večanjem hitrosti zraka se tudi prostori v notranjosti bolje ohlajajo. Ugotovljeno je bilo tudi to, da fasade z večjimi odprtinami za zajem in izpust zraka povzročijo boljši pretok zraka [16].

Tretji parameter razdelitve je vezan na razporeditev naprav, oz. odprtin za zajem in odvod zraka, kar vpliva na prezračevanje votline. Razlikujemo med 5-imi prezračevalnimi načini: Buffer Zone (BZ), Outdoor Air Curtain (OAC), Indoor Air Curtain (IAC), Air Supply (AS) in Air Exhaust (AE). [15]



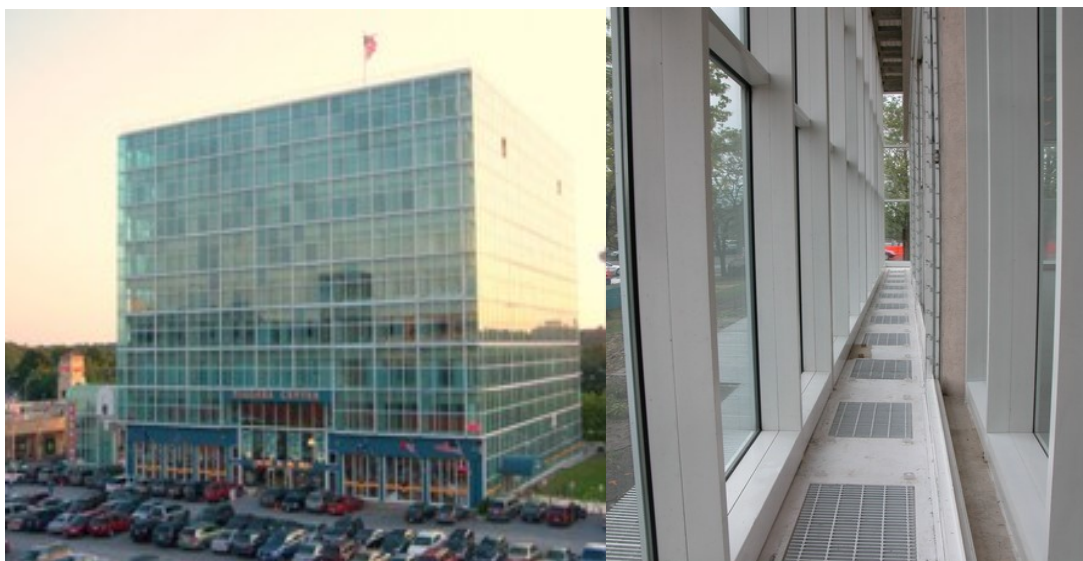
Slika 9: Izvedbe dvojnih fasad upoštevajoč razporeditev odprtin, z leve proti desni po vrsti: Buffer Zone (BZ), Outdoor Air Curtain (OAC), Indoor Air Curtain (IAC), Air Supply (AS) in Air Exhaust (AE) [15]

Podobno kot zgoraj našteto, sta v Severni Ameriki Thomas Herzog in Werner Lang razdelila dvojno fasado na 3 osnovne tipe, in sicer »*buffer system*« oz. ločen prostor za prezračevanje, ki ni povezan s HVAC sistemom, »*extract air system*«, kjer zračni prostor med zasteklitvijo postane del HVAC sistema in »*twin face system*«.



Slika 10: Buffer sistem, extract air sistem in twin face sistem (po vrsti il leve proti desni) [12]

Buffer sistem so uporabljali že pred 100 leti. Je prednik izolacijskih stekel in je bil ustvarjen z namenom ohranjanja dnevne svetlobe ter povečanja toplotne in zvočne izolativnosti. Uporabljajo enojno zasteklitev, kjer so 2 plasti stekla med seboj oddaljene 25 do 90 cm in kjer lahko svež zrak prihaja v notranjost ali s pomočjo ločenega HVAC sistema ali skozi okno. Senčila so po navadi postavljena v prezračevalni kanal. Primer stavbe, kjer je uporabljen tak sistem je Occidental Chemical/Hooker Building v zvezni državi New York v ZDA, arhitekta Marka M. Mandella.



Slika 11: Occidental Chemical/Hooker Building v New Yorku [17]

Pri *extract air* sistemu zračni prostor med dvema plastema stekla postane del HVAC sistema, oz. sistema za prezračevanje. Uporabljeni topli zrak med zasteklitvama se s pomočjo ventilatorjev potisne skozi votlino in segreje notranjo stran zasteklitve, medtem ko zunanja stran zasteklitve preprečuje toplotne izgube. Svež zrak se dovaja s pomočjo HVAC sistema, ki onemogoča naravno prezračevanje. Taki sistemi niso energijsko varčni saj se sveži zrak dovaja mehansko. Širina ventilacijske cone je med 15 in 90 cm (biti mora dovolj širok za neovirano čiščenje in namestitev senčil, ki se jih ravno tako namesti v notranjost ventilacijske cone). Tak sistem se uporablja tam kjer naravno prezračevanje ni mogoče [12].

Twin sistem. Enojno zastekljena zunanja fasada je namenjena zaščiti elementov v votlini (predvsem senčila) pred zunanjimi vplivi (v primeru močnega vetra preprečuje turbulence v votlini - v primeru odpiranja oken notranje fasade, zmanjšuje hrup). Širina ventilacijske cone je med 50 in 60 cm zaradi potreb čiščenja. Notranja steklena fasada pa je namenjena preprečevanju toplotnih izgub. Osnovna razlika med tem in ostalima dvema sistemoma je, da se notranja fasada lahko odpira in omogoči dostop svežega zraka neposredno skozi okno. Prav tako lahko s pomočjo odpiranja oken notranje fasade aktiviramo nočno hlajenje. Primer take izvedbe dvojne fasade je stavba Telus v Vancuvru, arhitekta Gregoryja Herniqueza [12].

Seveda pa obstajajo tudi t.i. hibridni sistemi, kjer je na sami stavbi uporabljenih več sistemov, oz. so izvedeni drugače [12].

5.4 Strujanje zraka v prezračevalnem kanalu

Prostor med fasadama deluje kot termična tamponska cona in kot prezračevalni/ventilacijski kanal kjer se struja zrak. Strujanje zraka je bodisi naravno ali pa mehansko (razni ventilatorji). Naravno prezračevanje zmanjša rabo električne energije za klimatizacijo in posledično zmanjšuje izpuste CO₂ v celotni življenjski dobi obratovanja stavbe.

Naravno prezračevanje deluje po dveh osnovnih principih. Do strujanja, oz. gibanja zraka pride bodisi zaradi razlike v tlaku, ki je posledica samega vetra (na privetrni strani je pozitiven tlak-vlek, na zavetrni strani je pa negativen tlak-srk), bodisi zaradi razlike v tlaku, ki je posledica termičnega vzgona. Zunanja fasada in s tem votlina se namreč segreje, topel zrak tako zavzema večji volumen kot mrzel in je zaradi tega lažji pri istem volumnu – ima manjšo gostoto [14]. Spodaj je opisana enostavna enačba za določitev razlike v pritisku zaradi termičnega vzgona:

$$\Delta p = \Delta \rho \times g \times \Delta h \quad (1)$$

Kjer je:

- $\Delta \rho$ = razlika v gostoti zraka zaradi temperaturne razlike [kg/m³]
- g = težnostni pospešek [m/s²]
- Δh = višina dvojne fasade [m]

Kot je prikazano v formuli je »vlek dimnika«, oz. termični vzgon odvisen od višine prezračevalnega kanala, oz. votline. Ravno zaradi tega so naravno prezračevane fasade aplicirane v večnadstropnih stavbah (večja višinska razlika). Eden izmed problemov na naši fasadi je ravno majhna višinska razlika za naravni način prezračevanja. Razmišljati bi bilo mogoče treba o mehanskem prezračevanju, oz. prenoviti obstoječo fasado z namenom zagotavljanja boljšega strujanja zraka v votlini.

5.5 Širina prezračevalnega kanala

Pravilna zasnova širne prezračevalnega kanala je ključna za dobro delovanje dvojne fasade. Dimenzija širine odprtine varira. Pri Occidental Chemical/Hooker Building v New Yorku je na primer širina 1,5 m, pri stavbi Caisse du Depot v Montrealu pa le 15 cm.

Članek (S. Barbosa, K. Ip / Renewable and Sustainable Energy Reviews 40 (2014), 1019–1029) navaja širino kanala od 10 cm do celo 200 cm v odvisnosti od vrste senčil ter od načina vzdrževanja in čiščenja.

Načeloma je pri bolj ozkih strujanje zraka bolj izrazito, vendar je vzdrževanje težje, bolj široke pa zahtevajo večjo količino konstrukcijskega materiala in s tem večje stroške. Načeloma je 40 cm meja med ozko in široko ventilacijsko cono. Širina naj bi vendarle bila nekje okrog 40 cm [14].

Kot že rečeno, ožji kanali naj bi povzročili boljši »dimniški efekt« in močnejši vlek po fasadi, medtem ko v širših (več kot 1 m širine) prihaja do slabšega vleka in do povečanja prenosa toplote v notranjost, česar si v toplih mesecih ne želimo [16].

Upoštevajoč vidik povprečne temperature zraka v notranjem prostoru in povprečne temperature zraka v votlini, naj bi bilo idealno razmerje med višino in širino votline okrog 30. Višina naj bi bila torej v povprečju 30-krat večja od širine. Manjše vrednosti namreč bistveno ne povečujejo izolativnosti v primeru zaprtih loput (ki so v zimskem scenariju bolj učinkovite od odprtih), višje vrednosti pa zmanjšujejo izolativnost. Tudi v primeru poletnega scenarija so prišli do ugotovitve, da je najboljše razmerje med višino in širino votline okrog 30 [18].

5.6 Senčila

Preprečitev pregrevanja in bleščanja izvajamo s senčili, ki so bodisi fiksna, bodisi pomična (delujejo avtomatsko ali s pomočjo uporabnika). Fiksna senčila večinoma niso učinkovita zaradi različnih vpadnih kotov sončnih žarkov skozi dan, oz. leto. Po navedbi [16] je najugodnejši položaj senčil v prezračevalnem prostoru med fasadama. Glavna razloga za tak način postavitve senčil sta zmanjševanje stroškov vzdrževanja, oz. servisa le-teh, saj dvojna fasada ščiti senčila pred zunanjimi vplivi, ter povišanje temperature v votlini zaradi absorpcije senčil in s tem povečanje »dimniškega efekta« oz. termičnega vzgona po fasadi. Obstajajo 3 načini postavitve senčil znotraj votline, in sicer postavitve bližje zunanjem robu fasade, postavitve v sredini kanala in postavitve bližje notranjem robu fasade. Postavitve senčil bližje notranjosti, poviša temperaturo na površini notranjega stekla. Zaradi večjega prenosa toplote s konvekcijo iz kanala v notranjost prostora, obstaja možnost pregrevanja le-teh. V primeru postavitve senčil na sredini kanala, pa je bila cirkulacija zraka v kanalu enakomerna in dobra na obeh straneh senčil.

Analiza o vplivu žaluzij na prezračevanje v kanalu je pokazala, da poleg funkcije senčenja, žaluzije tudi izboljšajo naravno prezračevanje v kanalu, saj se zaradi turbulenc okrog letvic žaluzij ustvari močan vzgonski moment, ki odpelje zrak proti vrhu kanala. Ko so žaluzije pod kotom 80 stopinj naj bi se naravno prezračevanje v kanalu zaradi vzgona povečalo za kar 35 %. Najslabše je letvice postaviti v horizontalni položaj saj v takem primeru predstavljajo oviro za pretok zraka (višji koti so boljši). Tudi sama barva senčil ima pomembno vlogo. Študija je namreč pokazala, da je bila temperatura v kanalu kjer so bila senčila črne barve za 11°C višja od temperature v kanalu pri belih senčilih [16].

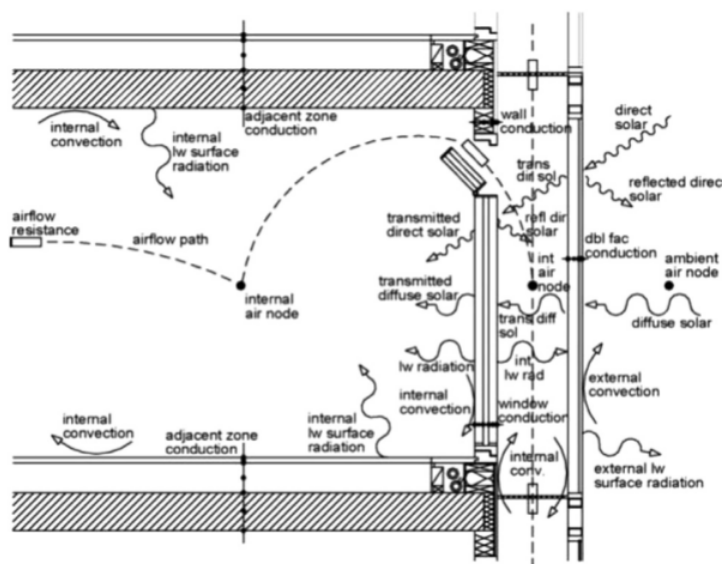
5.7 Zasteklitev

Prenos toplote pri dvojnih fasadah je zelo kompleksen proces, najbolj pa je odvisen od vrste zasteklitve. Ko sončno sevanje doseže zunanji ovoj fasade se en del odbije (reflektira) in je tako sploh ne segreje, en del se absorbira, en se pa prenese skozi (transmitira).

Sevanje, ki se je absorbiralo oddaja toploto. Del toplote se vrača v zunanost, del pa zasteklitev odda v notranji prostor (odvisno od termičnih lastnosti same zasteklitve in zunanje, oz. notranje temperature zraka).

Sončno sevanje, ki se transmitira skozi prvo zasteklitev, se absorbira v drugi (notranji ovoj fasade), ki se segreje in oddaja (emitira) toploto, oz. dolgo valovno sevanje v vseh smereh. Ker gre za dolgovalovno sevanje, to sevanje ostane ujeto v kanalu (nekaj se ga spet reflektira od zunanjega stekla, nekaj pa se ga absorbira v njem). Temu principu pravimo efekt tople grede. To ujeto sevanje, segreje zrak v kanalu, zaradi katerega prihaja do termičnega vzgona, oz. gibanja zraka navzgor.

Še en del sončnega sevanja pa neposredno penetrira, oz. transmitira v prostor. Celotna energija, ki pride v prostor (solar factor) je tako seštevek transmitirane in absorbirane komponente, ki oddaja energijo v notranjost prostora [16].



Slika 12: Princip prenosa sevanja v dvojni fasadi [16]

Pri fasadi, kjer zunanje okno transmitira malo, absorbira pa veliko sevanja, notranje pa malo emitira, dobimo sistem s primanjkljajem toplote, saj je v tem primeru večina toplote blokirana še preden vstopi v kanal. Najintenzivnejše gibanje zraka v kanalu naj bi se dogajalo pri sistemih, kjer je visoko absorptivna notranja zasteklitev v kombinaciji z zunanjo zasteklitvijo, ki ima razmerje

transmitivnost/absorptivnost približno 0.4. Zato je tudi navada, da se pri naravno prezračevanih dvojnih fasadah na zunanji ovoj postavi enojna zasteklitev z višjo transmitivnostjo, na notranji pa običajno dobro absorptivna dvojna zasteklitev, ki je boljše toplotno izolativna. S svojimi dobrimi izolativnimi lastnostmi namreč zmanjša prenos toplote z radiacijo in kondukcijo skozi fasado. Samo dobra izvedba zasteklitev bo tako povzročila dober vlek, oz. »dimniški efekt« in s tem efektivno, oz. energijsko učinkovito delovanje same fasade [16].

5.8 Sončno sevanje in orientacija

Sončno sevanje in orientacija je eden izmed najpomembnejših kriterijev pri načrtovanju same fasade. V povprečnem sončnem dnevu naj bi temperatura v kanalu pri dvojni fasadi (južno orientirana fasada, S polobla, brez senčenja), presegla zunanjo temperaturo zraka za 20 °C, medtem ko v oblačnih dneh največ za 10 °C [16].

Najboljša orientacija za dvojne fasade naj bi bila J z 45° odstopanjem, torej tudi JV in JZ orientacije. V in Z so slabše, S pa najslabše. To je tudi najbolj smiselno, saj dobijo največ direktne komponente sončnega sevanja. Upoštevati je treba tudi ovire, ki senčijo sam objekt. Pri našem objektu je dvojna fasada postavljena okoli celotnega objekta, na V strani je v neposredni bližini postavljen trgovski objekt Lidl, ki zelo senči objekt, JZ fasado pa nekoliko senči samo grmičevje ob objektu. Oba dejavnika zelo vplivata na slabo delovanje same fasade [16].

5.9 Prezračevanje s pomočjo vetra

5.9.1 Prezračevanje v dnevnem času

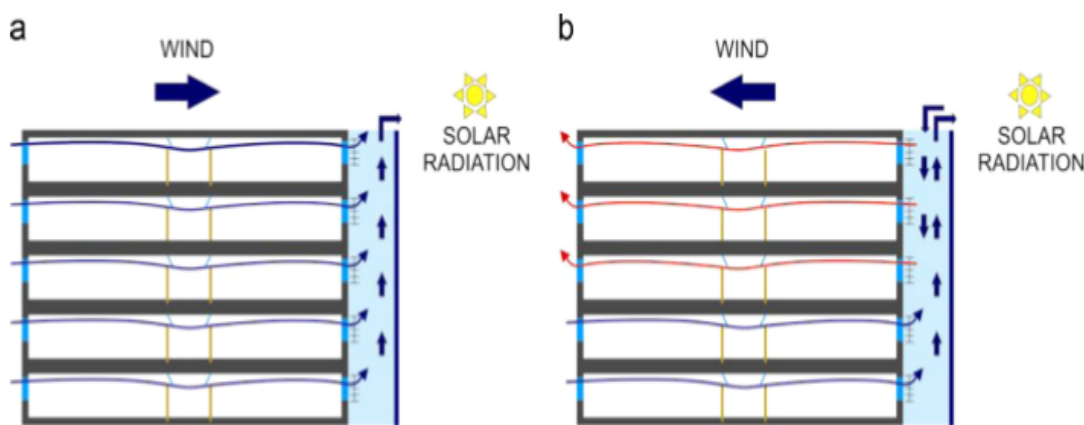
Dvojna fasada se pogosto uporablja v področjih, kjer je bodisi zaradi močnega vetra onemogočeno prezračevanje z odpiranjem samih oken, saj prepih povzroča neugodje, bodisi je odpiranje oken nezaželeno zaradi prevelikega hrupa (predvsem promet). V primeru stavbe SOP Krško bi glede na trenutno stanje težko govorili o omenjenih težavah.

Pri dnevnem prečnem prezračevanju stavbe z dvojno fasado je zelo pomembna orientacija dvojne fasade (južna ali severna) in smer vetra. V kolikor je dvojna fasada orientirana na jug je zaradi velikega vzgonskega učinka najbolj primeren veter iz severne smeri, v nasprotnih primerih se lahko zračni tok obrne in topel zrak vstopa v pisarne. V kolikor je dvojna fasada na severni strani, pa je temperatura zraka v votlini podobna zunanji temperaturi in zaradi manjšega zračnega toka prečno prezračevanje ni tako sporno [19]. Prezračevanje iz severa proti jugu oziroma obratno (prečno prezračevanje) bi bilo v naši stavbi morda nekoliko oteženo zaradi nesimetričnosti prostorov in zidov. Upoštevati pa je treba tudi dejstvo, da je na našem objektu dvojna fasada postavljena okrog celotnega objekta, zato ne moremo

govoriti o izraziti severni ali južni orientaciji. Posledično je tudi težko ovrednotiti zgornjo trditev. Naj dodam, pri stavbi SOP Krško dejansko nimamo klasične dvojne fasade, ampak klasično zidano steno + enojno stekleno fasado.

Do najboljšega vleka v fasadi potemtakem pride, ko se veter nahaja v njeni zavetrni strani, oz. ko do nje prihaja iz hrbtne strani. V teh primerih ima v višjih nadstropjih učinek termičnega vzgona manj vpliva na gibanje zraka kot sama hitrost vetra. Se pa vlek z višino ne spreminja veliko (slika 13, primer a). V nasprotnem primeru, ko torej veter piha proti fasadi, pa je učinek obraten. V nižjih nadstropjih ta problem ni toliko izrazit, saj zrak prispe do votline. V višjih nadstropjih pa se zaradi nasprotne smeri vetra zgodi, da veter vrača topli zrak v votlino in tako ogreva notranjost zgornjih prostorov (slika 13, primer b).

Upoštevati je treba tudi smer vetra, saj veter, ki piha pravokotno, povzroči boljši zračni pretok kot veter, ki je vzporeden s fasado [16].



Slika 13: a) zavetrna stran in b) privetrna stran [16]

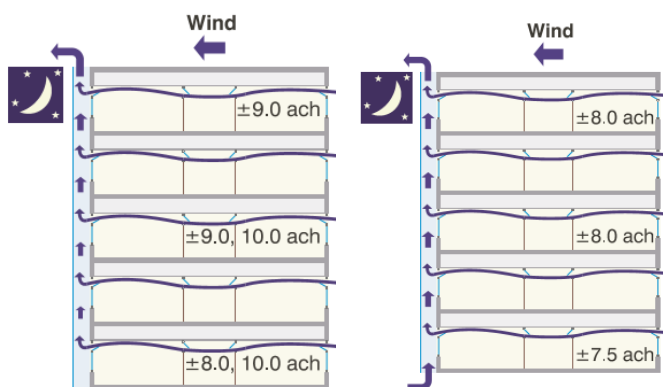
V zanimivi študiji dvojnih fasad, ki je bila objavljena v znanstveni publikaciji *Energy and Buildings* 36 (2004) 1139–1152, pod naslovom *Natural cooling strategies efficiency in an office building with a double-skin façade*, je bilo opisano, da v kolikor je dvojna fasada (južna orientacija) senčena znotraj votline in zaprta, se zaradi učinka tople grede temperatura v votlini dvigne na 47 do 52 °C. Šlo je za računalniško simulacijo kraja Uccle v Belgiji, izbran je bil sončen dan, 24. julij, maksimalna dnevna temperatura zraka 23,3 °C, hitrost zraka je relativno konstantna, in sicer 4 m/s. Dodatno je bilo ugotovljeno še dejstvo, da 2,5 cm odprtina (zgoraj in spodaj) povzroči 10 izmenjav zraka v eni uri in zmanjša temperaturo na 40 °C, 20 cm odprtina (zgoraj in spodaj) povzroči 50 izmenjav zraka v eni uri in zmanjša temperaturo na 30 °C, 50 cm odprtina (zgoraj in spodaj) pa povzroči kar 100 izmenjav zraka v eni uri in temperatura se spusti na 27 °C. Če povzamemo, velikost odprtin za zajem in odvod zraka povzroči bistveno povečanje števila izmenjav zraka v časovni enoti ter zmanjšanje temperature zraka v votlini [19].

5.9.2 Nočno prezračevanje/hlajenje

Glede na to, da so temperature ponoči v poletnem času v Ljubljani skoraj vedno nižje od notranjih temperatur zraka v prostorih, je nočno hlajenje definitivno dober in enostaven način za ohlajanje objekta.

Prezračevanje objekta v nočnem času ni tako delikatno kot podnevi. Smer strujanja zraka v prostoru namreč ni tako pomembna, saj je temperatura v dvojni fasadi bistveno nižja in posledično ni tako močnega vleka. Poleg tega je nočno hlajenje pri dvojni fasadi enostavneje tudi z vidika varnosti pred vandalizmom, saj so odprtine zavarovane z zunanjo stekleno fasado. Podobno kot pri dnevnem prezračevanju je tudi pri nočnem najboljša severna smer vetra, v kolikor je dvojna fasada orientirana južno [19].

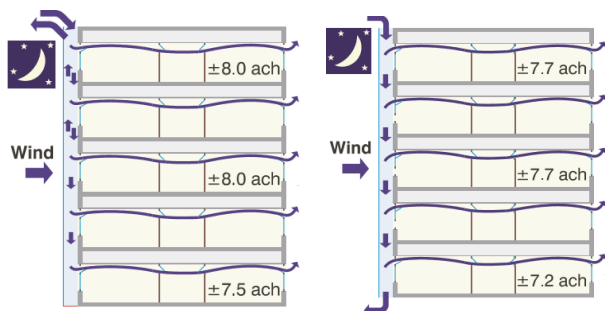
Pri nočnem hlajenju je hitrost strujanja zraka konstantna zaradi pretežno konstantne temperature zraka v dvojni fasadi (ni takega odstopanja kot podnevi). V zgoraj omenjeni študiji, torej *Natural cooling strategies efficiency in an office building with a double-skin façade*, je pa opisano zanimivo dejstvo, da je v kolikor je odprta samo zgornja loputa, ta hitrost nekoliko višja in prihaja do več izmenjav zraka na enoto časa kot pa v primeru odprtja tako spodnje kot zgornje lopute. Z odprtjem spodnje lopute naj bi se namreč zmanjšal vzgonski učinek. Pojav je viden na sliki 14, kjer vrednost ach pomeni air change per hour, oz. air change ratio, kar pomeni število izmenjav zraka v časovni enoti (v eni uri). Leva slika prikazuje vrednosti pri odprtju samo zgornje lopute, desna pa pri odprtju zgornje in spodnje [19]. Upoštevati pa je treba tudi to, da gre za računalniško analizo, ki bi jo bilo vsekakor treba podkrepiti s konkretnimi meritvami na objektu. Na našem objektu bi bilo to praktično nemogoče zaradi slabo delujočih loput.



Slika 14: Južna fasada, severna smer vetra [19]

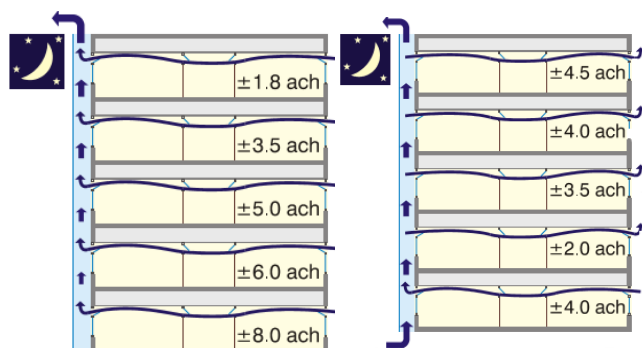
Spodaj so opisani še vsi ostali možni primeri za južno orientirano dvojno fasado, kjer se prav tako z odprtjem obeh loput zmanjša količina izmenjanega zraka na časovno enoto (ponovno, leva slika prikazuje vrednosti pri odprtju samo zgornje lopute, desna pa pri odprtju zgornje in spodnje):

- Veter iz južne smeri z južno orientirano dvojno fasado



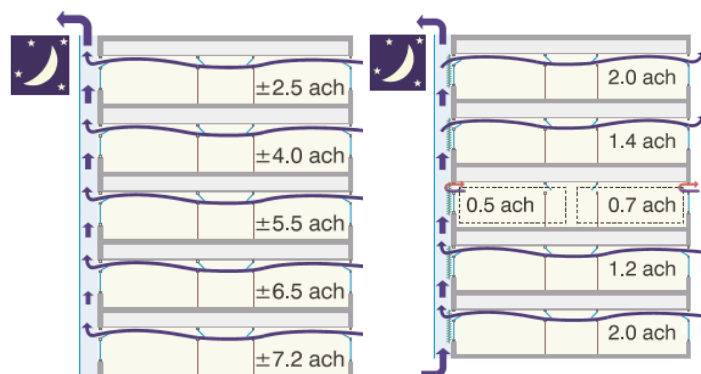
Slika 15: Južna fasada, južna smer vetra [19]

- Veter iz vzhodne in zahodne smeri z južno orientirano dvojno fasado



Slika 16: Južna fasada, vzhodna in zahodna smer vetra [19]

- Brez vetra



Slika 17: Južna fasada, brez vetra [19]

Kot je bilo že opisano zgoraj, se z večanjem velikosti odprtih, večajo tudi vrednosti pretoka zraka. Je pa vprašanje koliko lahko dajanske rezultate apliciramo na naš objekt, glede na to, da je pri stavbi SOP Krško dvojna fasada orientirana po vseh fasadah in ne samo na jugu, kot je bilo to opisano v omenjeni študiji. Potrebne bi bile natančnejše analize.

5.10 Čiščenje prezračevalnega kanala

Od zasnove dvojne fasade je odvisen tudi način čiščenja, ki je bistveno za normalno obratovanje stavbe. Upoštevati je namreč treba, da je delovanje dvojne fasade neposredno povezano s čistočo njenih transparentnih površin, oz. zasteklitve. Slednja namreč vpliva na njeno transmitivnost in posledično na solarne dobitke, ki so osnovni pogoj za pojav termičnega vzgona. Neprekinjene votline, ki potekajo po celotni višini fasade, zahtevajo bodisi sistem vrvi s katerimi so pritrjeni delavci, bodisi platformo podobno tistim, ki jo uporabljajo za čiščenje zunanjih oken na stavbah. Pri tem se morajo vsa senčila znotraj kanala umakniti. Nekateri objekti imajo po etažah razdeljeno horizontalno pohodno rešetko, ki omogoča nemoteno hojo in čiščenje. Podobna rešitev je izvedena na našem objektu SOP Krško. Rešetka ne sme biti pregosta, saj mora zrak prehajati. Kjer čiščenje poteka na tak način mora biti širina votline med 60 in 90 cm. Kjer so dimenzije manjše, se morajo notranja okna odpirati in čiščenje poteka iz notranjih prostorov. Raziskave so pokazale, da se okna pri dvojnih fasadah v povprečju čistijo 2 do 4 krat na leto. Zanimivo je tudi to, da imajo nekatere novejšje stavbe (npr. Telus Building, 2001) za razliko od starejših (Hooker Building, 1983) možnost zaprtja loput za vhod zraka v času, ko je ta onesnažen (npr. v času prometnih konic) [12].

5.11 Upravičenost dvojne fasade in stroški

Dejstvo je, da so investicijski stroški pri izvedbi stavb z dvojno fasado višji. V Evropi naj bi bili ti stroški dva krat višji, v Združenih državah Amerike pa kar štiri ali pet krat višji od stroškov izvedbe konvencionalne fasade. V Združenih državah Amerike so ti stroški povezani s samimi konstrukcijskimi stroški izvedbe in slabim poznavanjem trgovcev in obrtnikov teh sistemov. Je pa treba dodati, da je v Evropi električna energija nekoliko dražja. Ob pravilni izvedbi arhitekturnih in konstrukcijskih zasnov, pa ti sistemi zahtevajo manj HVAC inštalacij, kar je vsekakor velik plus [12].

Kar se tiče obratovalnih stroškov, so ti nižji, v sami stavbi pa se povečajo stroški vzdrževanja, kamor spadajo npr. čiščenje oken, senčil, dražji mehanizmi za delovanje in stroški popravila, oz. menjave (sploh če gre za avtomatizirane sisteme).

Če povzamem, v kolikor stavbe z dvojno fasado res porabijo manj energije in so obratovalni stroški nižji, so začetni investicijski stroški upravičeni.

Dejstvo je, da je konvencionalna stavba zgrajena iz masivne nosilne konstrukcije in s primerno debelino toplotne izolacije energijsko bolj varčna in so zanjo stroški vzdrževanja manjši, vendar je treba pri zasnovi objektov upoštevati tudi zadovoljstvo uporabnikov, ki bivajo, oz. delajo v njej. Številne raziskave so namreč pokazale da se ob zadostni količini dnevne svetlobe in neposrednega stika uporabnikov z zunanostjo, ter ob naravnem prezračevanju prostorov, storilnost zaposlenih bistveno

poveča, kar dolgoročno povrne investicijske stroške. Zaradi ugodne delovne klime delavci tudi manj zbolevajo (cit. po Dovjak, M., 2016, izvirni iz predavanj Ergonomija bivalnega okolja).

5.12 Energijska učinkovitost dvojnih fasad

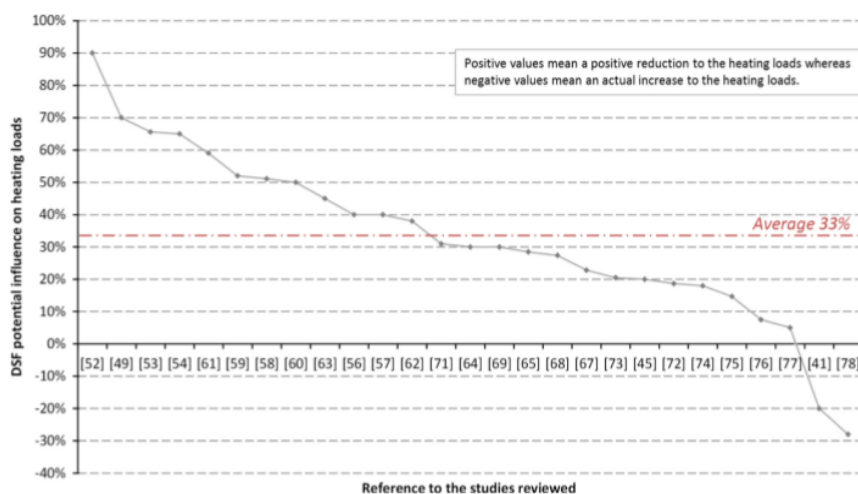
Čeprav so dvojne fasade že nekaj časa aktualna tematika je študij, oz. analiz o sami energijski učinkovitosti še vedno zelo malo in so dokaj nenatančne.

Gradbeništvo je odgovorno za več kot polovico svetovne rabe energije in proizvodnje toplogrednih plinov. Brez pravih rešitev in z neodgovornim vedenjem naj bi se količina toplogrednih plinov do leta 2050 podvojila [14]. Prav zaradi teh dejstev so dvojne fasade pravi potencial za gradnjo v prihodnosti.

Spodnja grafikona (grafikon 1 in grafikon 2) prikazujeta primerjavo med dvojnimi fasadami in bodisi enojnimi steklenimi fasadami, bodisi navadnimi konvencionalnimi fasadami z vidika zmanjšanja rabe energije za ogrevanje in hlajenje. Šlo je za matematične analize, računalniške simulacije in eksperimente na dejanskih dvojnih fasadah. Pri izračunu rabe energije so bili upoštevani vsi kriteriji, torej orientacija, tip prezračevanja, konfiguracija votline (postavitev, prisotnost rastlinja, low-e nanosi), širina votline, prisotnost senčil v votlini, itd. Za potrebe te analize je bilo preučenih 247 člankov, od tega 55 bolj podrobno. Študija je bila objavljena v znanstveni publikaciji Renewable and Sustainable Energy Reviews 54 (2016), pod naslovom Energy performance of Double-Skin Façades in temperate climates: A systematic review and meta-analysis.

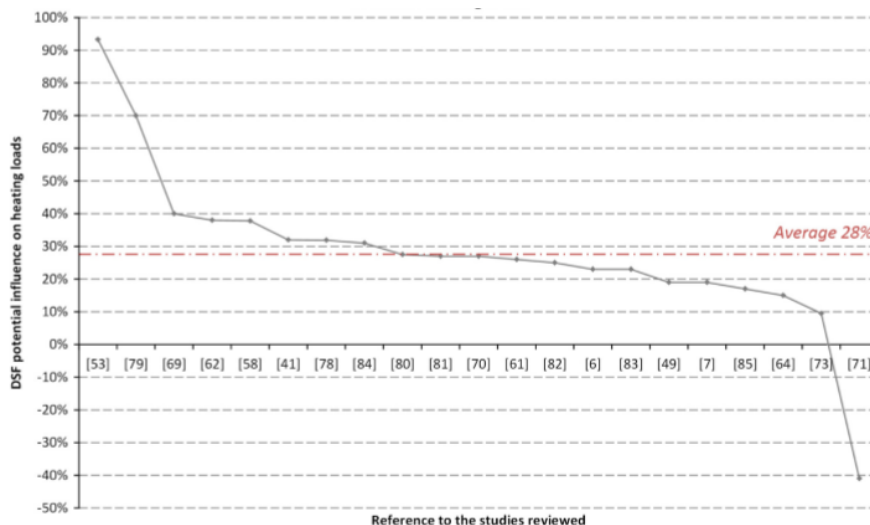
Procent zmanjšanja rabe energije za:

- Gretje



Grafikon 1: Prihranek rabe energije za gretje v % (v povprečju 33%) [14]

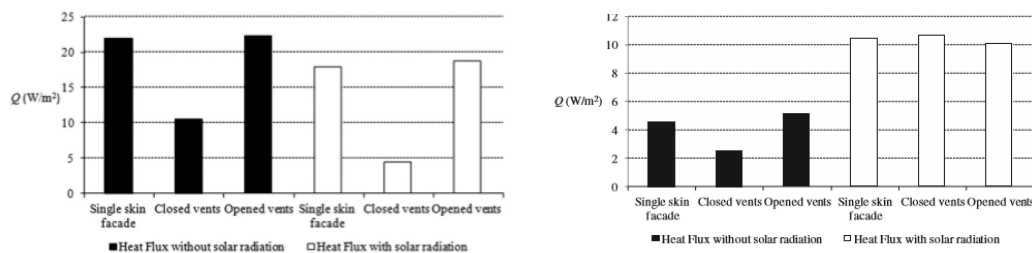
- Hlajenje



Grafikon 2: Prihranek energije potrebne za hlajenje v % (v povprečju 28 %) [14]

Kot je bilo v študiji opisano ima dvojna fasada poleg vizualnega vpliva, vpliv tudi na notranje ugodje uporabnikov, ki ga dosega z energijsko bolj varčnim (prihranki pri ogrevanju so v povprečju 33%, pri hlajenju pa 28%) in okolju prijaznim (manjši izpusti CO₂) pasivnim hlajenjem in ogrevanjem; seveda ob upoštevanju pravilnega obratovanja (širina in višina prezračevalnega kanala, načina prezračevanja, orientacije, itd.)

Študija Influence of natural ventilation due to buoyancy and heat transfer in the energy efficiency of a double skin facade building, ki je bila objavljena v Energy for Sustainable Development 33 (2016), je pokazala, da je za primer zimskega scenarija količina dovedene toplote za dosego 20 °C v notranjem prostoru, ne glede na to ali je prisotno sončno sevanje ali ne, manjša kot pri enojni fasadi. Vrednost je večja samo če so lopute odprte, kar je za zimski scenarij tudi logično. Za primer poletnega scenarija pa je količina toplote, ki jo moramo odvesti za dosego 26 °C, v kolikor ni prisotno sončno sevanje, pri dvojni fasadi večja kot pri enojni fasadi (odprte lopute). V primeru, ko so lopute zaprte, pa je ta vrednost manjša, kar je nekoliko presenetljivo. V kolikor pa je sončno sevanje prisotno, je količina toplote, ki jo moramo odvesti za dosego 26°C, pri odprtih loputah, manjša. V primeru zaprtih loput je zadeva logično ravno nasprotna, saj se topel zrak kopiči v votlini [18].



Grafikon 3: Količina dovedene toplote za različne primere fasad za dosego 20 °C pozimi (levo) in količina odvedene toplote za različne primere fasad za dosego 26 °C poleti (desno) [18]

V najboljšem primeru se poleti prihrani 4% energije za hlajenje, pozimi pa 75% energije za gretje v primerjavi z enojno konvencionalno fasado. Šlo je za računalniški model izveden s programskim orodjem ANSYS Fluent 14, pretok zraka znotraj votline je bil konstanten.

Tabela 5: Prihranek energije v % [18]

Scenario	Solar radiation	Vents	Energy saving (%)	Increased energy use (%)
Winter	No	Closed	52.3	
		Opened		1.5
	Yes	Closed	75.1	
		Opened		5.1
Summer	No	Closed	44.3	
		Opened		12
	Yes	Closed		1.4
		Opened	4	

Še ena raziskava, in sicer raziskava Franklina Andrews, profesorja Michaela Wiggintona iz Univerze v Plymouthu in Battleja McCarthyja iz Ministrstva za okolje, promet in prostor Velike Britanije (United Kingdom Department of Environment, Transport and Regions), ki je bila objavljena v publikaciji Understanding the Principles of the Double Façade System, je pokazala, da se pri stavbah z dvojno fasado raba energije zmanjša za 65 %, obratovalni stroški za 65 %, emisije CO₂ pa za 50 %, v zmerno hladnem podnebju značilnem za Veliko Britanijo, v primerjavi s konvencionalnimi stavbami z enojno fasado [12].

Zgoraj naštetih vrednosti se seveda ne moremo slepo držati, predvsem zaradi tega, ker gre večinoma za računalniške analize in ne konkretne meritve na objektih. A se moramo vendarle zavedati, da je ob pravilni izvedbi in dobrem vzdrževanju dvojna fasada lahko energijsko bolj varčna od navadnih konvencionalnih fasadnih sistemov.

5.13 Primeri dobre prakse

5.13.1 Manitoba Hydro Place

Manitoba Hydro Place, sicer sedež javne službe za električno energijo in zemeljski plin v provinci Manitoba v Kanadi, je edina poslovna stavba v Kanadi z LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) Platinum certifikatom, ki je v svetovnem merilu najbolj znan in uveljavljen certifikat za t. i. zelene stavbe. Gre pa tudi za energetske najbolj varčno stavbo v Severni Ameriki in eno izmed energijsko najučinkovitejših na svetu. S svojo 115 metrsko dvojno fasado ustvarja odličen dimnični efekt z naravno konvekcijo. Z motoriziranim računalniško krmiljenim sistemom za zajem in odvod zraka omogoča zelo natančno uravnavanje temperature. Za delovanje uporablja geotermalno energijo. S takšnim načinom delovanja naj bi omenjena stavba privarčevala 70 % več energije od tradicionalnih stavb. Letna raba električne energije za stavbo Manitoba Hydro Place znaša manj kot 100 kWh/m², kar je za stavbe v tej klimi izjemno malo. Povprečna vrednost letne rabe električne energije za poslovne stavbe v omenjenem hladnem podnebjju je namreč od 400-500 kWh/m² [20].



Slika 18: Manitoba Hydro Place [20]

5.13.2 One Angel Square

Gre za poslovno stavbo v Manchesteru. Bila je ocenjena z bonitetno oceno "Outstanding" (kar je najboljša možna ocena) Breeam-ove (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) metode ocenjevanja trajnosti stavb. Objekt se napaja s pomočjo biodizla, proizvedenega iz oljne repice, ki ga oskrbuje z električno energijo in toploto. Dvojna steklena fasada izkorišča solarne dobitke za toploto, stavba se naravno prezračuje skozi dvojno fasado, izkorišča deževnico za potrebe sanitarne vode, reciklira meteorno vodo in reciklira odpadno toploto. Zanimivost stavbe je tudi ogromni notranji atrij, obrnjen proti jugu in zastekljen, ki pripomore k večjemu izkoristku dnevne svetlobe in solarnih dobitkov. Zaradi boljše učinkovitosti je atrij v naklonu. Pregrevanje in bleščanje znotraj objekta

preprečujejo zunanja senčila. Zaradi vsega zgoraj naštetega spada stavba v razred plus energijskih hiš, ki ima sposobnost izkoriščanja obnovljivih virov za proizvodnjo energije. Stavba torej proizvede več energije, kot je za svoje delovanje porabi, minimalne pa so tudi emisije toplogrednih plinov. Stavba je prejela številne nagrade za svoje presenetljive estetske in trajnostne rešitve [21].



Slika 19: One Angel Square [21]

5.13.3 Auckland's Glittering Green Geyser Office

Geyserjev kompleks v Aucklandu na Novi Zelandiji dejansko sestavlja pet objektov, ki so povezani z notranjim dvoriščem. Objekti dajejo s svojim trajnostnim načinom izgradnje zgled vsem poslovnim objektom, saj predstavljajo moderno energijsko učinkovito delovno okolje. Steklene dvojne fasade na vsaki stavbi pripomorejo k temu, da prodira naravna svetloba globoko v notranjost pisarn. Obenem pa deluje dvojna fasada tudi kot sistem za ogrevanje in hlajenje, z zajemanjem in gibanjem toplega ali hladnega zraka, ki pomaga regulirati notranjo temperaturo. Zunanji sloj dvojne fasade je preplaščen z low-e nanosom. Fasada naravno segreje vsako stavbo tako, da v zimskem času zapre topli zrak znotraj votline, kar čez noč precej zmanjša toplotne izgube in čez dan pregreje zunanji zrak. V toplejših mesecih se dvojna fasada odpira elektronsko in zagotavlja prečno konvekcijo zraka, ki usmerja zračne tokove iz hladnejših južnih strani (J polobla, zato so na južnih fasadah nižje temperature) skozi pisarne. Uslužbenci lahko z vrsto drsnih panelov regulirajo tok zraka. Dvojna fasada se prav tako avtomatsko zapre v primeru močnega vetra in dežja ter odpre v primeru previsoke koncentracije CO₂. Sistem za zbiranje deževnice zbira vodo za sanitarne prostore in namakalne sisteme za rastline okoli kampusa. Urad prav tako spodbuja ekološko osveščenost uslužbencev, saj imajo v objektu kolesarnico in tuše za prhanje [22].



Slika 20: Auckland's Glittering Green Geyser Office [23]

6 STAVBA SOP KRŠKO

6.1 Splošno

Stavba SOP Krško je bila sprojektirana leta 1986. Bila je delo arhitekta Janeza Lajovica. Stoji na Litijski cesti 51, v Štepanjskem naselju v Ljubljani. Zgradilo jo je gradbeno podjetje IMOS leta 1987 in še v istem letu v njo vselilo 140 delavcev inženirskega biroja podjetja SOP Krško. Leta 1990 se je nato v stavbo vselilo podjetje HERMES SOFTLAB, sicer informacijsko tehnološko podjetje. V objektu je zaradi hitre širitve in rasti podjetja delalo celo do 250 ljudi. Podjetje je delovalo do leta 2002, ko je prišlo do večjih težav in posledično do rekonstrukcije samega podjetja. Tako ga je leta 2008 kupilo podjetje COMTRADE, ki pa se je leta 2012 preselilo v nove prostore. Od leta 2012 je torej stavba SOP Krško prazna in se zanjo išče nov lastnik.

V času izgradnje je stavba delovala zelo moderno in bila vsaj z vidika estetike zgled mnogim poslovnim objektom. Dejstvo pa je, da je stavba predstavljala novost tudi iz tehnološkega zornega kota. Bila je namreč prvi primer »*double skina*« oz. dvojne fasade pri nas v Sloveniji. Zunanji sloj stekla je 30% zatemnjeno in daje stavbi prav poseben čar, saj je barva fasade različna iz različnih zornih kotov. Gibanje zraka v fasadi, ki omogoča vzdrževanje razmeroma enakomerne notranje temperature, je izvedeno s pomočjo vstopnih loput v spodnjem delu stavbe in kletni etaži, ter izstopnih loput za odvod zraka na terasi objekta [24].



Slika 21: Južna in zahodna fasada (levo), severna fasada (desno)

Celotna višina objekta znaša 14,88 m, višina dvojne fasade pa 11,16 m. Objekt je kvadratne oblike, z dolžino stranic 40,8 m.

Prezračevalni kanal ni razdeljen horizontalno ali vertikalno, temveč poteka neprekinjeno po celotni višini objekta. Taki izvedbi dvojne fasade pravimo »*multi-storey*«. V teoriji je z vidika dobrega prezračevanja ta sistem dober zaradi velike višinske razlike.

Zračni prostor, oz. votlina, ki ločuje fasadi, meri 75 cm. Takšna dimenzija in horizontalna pohodna rešetka, omogočata nemoteno hojo in čiščenje kaljenega stekla. Zunanje steklo je rahlo zatemnjeno, nima pa nikakršnega spektralno selektivnega premaza, oz. nanosa za sončno zaščito.

6.2 Sistemi za ogrevanje, hlajenje

Za ogrevanje objekta SOP Krško skrbi toplota iz toplarniškega omrežja KEL. Objekt se je ogreval indirektno preko prenosnika toplote, ki ima štiri ogrevalne veje: dve namenjeni za radiatorsko ogrevanje, ena za ogrevanje tople sanitarne vode in ena za dovod toplote do klimatske naprave. Za pripravo tople sanitarne vode je v toplotni postaji nameščen hranilnik toplote z volumnom 1500 L. Ogrevanje stavbe je pogojeno z dvocevnim radiatorskim ogrevanjem, s temperaturnim režimom 90/70/20 pri zunanji projektni temperaturi -21 °C. Vsa ogrevala imajo nameščene termostatske ventile.

Za hlajenje objekta naj bi v principu skrbela dvojna fasada s svojim naravnim prezračevanjem. Zaradi nepravilnega delovanja in posledično premajhne hitrosti gibanja zraka, pa je prihajalo do pregrevanja mirujočega zraka (še posebej je to izrazito na južni fasadi) in zato tudi notranjih prostorov.

Zaradi omenjenega pregrevanja notranjih prostorov so na streho objekta namestili lokalne klimatske naprave. Z njimi so sicer ohlajali prostore, a se je zaradi tega povečala raba energije za hlajenje. Upoštevati je bilo treba tudi to, da se je odpadni topli zrak iz klimatskih naprav kopičil na strehi in jo tako še dodatno segreval. Nekatere klimatske naprave so bile nameščene celo ob loputah za vstop in izstop zraka, kar zrak po nepotrebnem segreje.

Na notranji strani steklene strehe atrija, ki se je lahko odpirala, je bilo nameščeno platno, ki je služilo kot senčilo, a se je izvedba izkazala kot neučinkovita, saj platno ni bistveno prispevalo k nižanju temperature v atriju, predvsem zaradi tega ker je bilo nameščeno na notranjo stran.

V atriju je bila postavljena tudi fontana, ki je imela poleg vizualnega efekta, tudi svoj namen, evaporacijsko hlajenje. Služila naj bi namreč za ohlajanje atrija s pomočjo sistema naravnega hlapilnega hlajenja. Podatkov o tem koliko je bil sistem dejansko učinkovit, ni. V atriju so bila posajena tudi igličasta drevesa in drugo rastlinje [25].



Slika 22: Atrij objekta z vidnim platnom za senčenje zgoraj, fontano spodaj in zelenjem

6.3 Napake pri delovanju dvojne fasade

Pri pregledu samega objekta smo ugotovili kar nekaj nepravilnosti. Ključne so opisane v spodnjih alinejah:

- Lopute: nezmožnost odpiranja in zapiranja nekaterih spodnjih (zajem zraka) in zgornjih (odvod zraka) loput zaradi poškodb, dotrajanosti, korozije.
- Neprimerna pozicija klimatskih naprav (na strehi ob loputih za odvod zraka ter neposredno ob loputih za zajem zraka spodaj). S svojo pozicijo bodisi dodatno pregrevajo zrak v votlini, bodisi onemogočajo normalno odpiranje/zapiranje loput.
- Zunanji ovoj fasade (kaljeno steklo) ni primerno zatesnjeno. Med steklenimi paneli so namreč prisotne špranje, oz. ni tesnil. Zaradi netesnosti zunanjega ovoja naravna konvekcija po fasadi ni tako učinkovita. Najbrž je bila fasada taka že od samega začetka zaradi neprimerne montaže. Zaradi zgoraj omenjenega, je slabša tudi zvočna izolativnost in požarna varnost.



Slika 23: Špranje med paneli kaljenega stekla zaradi neprimerne zatesnitve

- Neprimerna namestitvev zunanjih senčil (postavljena so v votlini tik ob notranji fasadi), ki bi pripomogla k zmanjšanju sončnega obsevanja fasade in s tem preprečitvi pregrevanja notranjih prostorov.

Upoštevajoč ugotovitve in rezultate iz znanstvene in strokovne literature, oz. člankov in publikacij smo prišli do naslednjih ugotovitev:

- Pri nižjih stavbah je potrebna manjša širina ventilacijske cone, oz. pri majhni višini si pomagamo z mehanskim prezračevanjem. Glavni problem na naši fasadi je dejstvo, da majhna višina dvojne fasade in prevelika širina ventilacijske cone v kombinaciji z naravnim prezračevanjem, povzroča slab vlek.
- Senčila je treba postaviti v sredino ventilacijske cone, saj absorbirana toplota v senčilih dodatno segreva medprostor in termični vzgon se poveča. Pri nas so senčila na notranji strani kar je narobe, zunanja senčila v votlini pa se preblizu zasteklitvi. Tak položaj senčil poviša temperaturo na površini notranjega stekla. Zaradi večjega prenosa toplote s konvekcijo iz kanala v notranjost prostora obstaja možnost pregrevanja le-teh. Idealna pozicija je torej na sredini votline, saj je tudi cirkulacija zraka v kanalu enakomerna in dobra na obeh straneh senčil.
- Uporaba enojne zasteklitve za zunanjo fasado poveča prepustnost sončne svetlobe in s tem boljše segrevanje medprostora, na notranjo stran pa se običajno postavi dobro absorptivna dvojna zasteklitev.
- Doseči moramo dobro prepustnost v votlini, brez ovir in raznih elementov, ki zavirajo tok zraka. Tudi večje odprtine za zajem in izpust zraka povzročajo boljši pretok (pri nas so pohodne rešetke ki nekoliko zavirajo tok zraka, čeprav vpliv verjetno ni velik).

7 MERITVE

7.1 Meritve osvetljenosti na delovni ravni

Dostop sončne svetlobe predstavlja dandanes pomemben dejavnik, ki določa kvaliteto in pomen prostora v stavbi. Dnevna svetloba je pomembna iz dveh razlogov. Zmanjšuje namreč potrebo po električni energiji za umetno razsvetljavo in kot drugo še pomembneje, naravna svetloba veliko ugodneje vpliva na uporabnike v stavbi od umetne. Je namreč ena od bistvenih faktorjev za udobje uporabnikov. Sama spektralna sestava naravne svetlobe pozitivno vpliva na uporabnike, njihovo produktivnost in mentalno počutje, poleg tega pa je bistvena za tvorbo vitamina D, ki dokazano preprečuje mnoge vrste rakavih obolenj, preprečuje depresijo in je bistvena za obnovo kosti. Na osvetljenost prostora z dnevno svetlobo vpliva predvsem sama zasnova prostora, in sicer višina etaže v povezavi z globino prostora.

Za samega človeka in njegovo bivanje v stavbi je pomembna predvsem fotometrična količina, ki ji pravimo osvetljenost. Osvetljenost predstavlja gostoto svetlobnega toka, ki pade na površino.

Meritve osvetljenosti prostora sem izvajal v dveh povsem različnih dneh, in sicer enkrat v oblačnem vremenu, drugič v popolnoma jasnem vremenu. Pred izvedbo meritev sem si v prostoru določil 80 referenčnih točk, na oddaljenosti 0,5 oz. 1 m druga od druge oz. od mej prostora.

Pred vsako meritvijo v notranjosti prostora je bilo potrebno izmeriti svetlost zunanje neovirane točke. Te meritve sem izvajal na strehi objekta. Izmerjene rezultate sem potreboval za določitev količnika dnevne svetlobe (KDS) pri oblačnem nebu in razmerja osvetljenosti za primer jasnega neba. Meritve osvetljenosti sem izvajal z luks metrom.

Transmitivnost, ki predstavlja količino prepuščene svetlobe skozi zasteklitev sem ravno tako izmeril z luks metrom. Transmitivnost zasteklitve je določena kot razmerje med vrednostjo osvetljenosti skozi odprto in zaprto okno. Predvsem je bila ta vrednost pomembna zaradi analize s programskim orodjem, ki bo natančneje opisana v osmem poglavju.

Ker gre za dvojno stekleno fasado sem izmeril vrednost tik ob fasadi z zunanje strani na dan 18.4.2017 (oblačno vreme, ura 12:00) in 29.4.2017 (jasno vreme, ura 12.00), na južni orientaciji fasade (12600 lx v oblačnem vremenu, 137100 lx v sončnem vremenu), v prezračevalnem kanalu (3250 lx v oblačnem vremenu in 42240 lx v sončnem vremenu) in v notranjosti prostora tik ob oknu (1520 lx v oblačnem vremenu in 24600 lx v sončnem vremenu).

Če torej upoštevam razmerje 3250/12600, dobim npr. transmitivnost zunanjega kaljenega stekla v primeru oblačnega vremena. Skupna transmitivnost pa predstavlja razmerje med vrednostjo

osvetljenosti znotraj prostora (tik ob oknu) in vrednostjo osvetljenosti izven (tik ob fasadi). Transmitivnosti so opisane v spodnjih dveh tabelah. Vrednost je tako majhna zaradi izjemno umazanih oken, ki so posledica neobratovanja stavbe.

Tabela 6: Transmitivnosti zasteklitev v jasnem vremenu na dan 29.4.2017 ob 12:00 [-]

Položaj meritve	Osvetljenost [lx]	Transmitivnost zunanjega kaljenega stekla [-]	Transmitivnost notranje dvojne zasteklitve [-]	Skupna transmitivnost [-]
Zunaj pred oknom	137100	0,31	0,58	0,18
Prezračevalni kanal	42240			
Znotraj pred oknom	24600			

Tabela 7: Transmisivnosti zasteklitev v oblačnem vremenu na dan 18.4.2017 ob 12:00 [-]

Položaj meritve	Osvetljenost [lx]	Transmitivnost zunanjega kaljenega stekla [-]	Transmitivnost notranje dvojne zasteklitve [-]	Skupna transmitivnost [-]
Zunaj pred oknom	12600	0,26	0,47	0,12
Prezračevalni kanal	3250			
Znotraj pred oknom	1520			

7.1.1 Meritve v oblačnem vremenu

Meritve horizontalne osvetljenosti v oblačnem vremenu sem opravil na delovni ravni, t.j. na višini 85 cm nad tlemi. Vrednost osvetljenosti zunanje neovirane točke je bila 17600 lx.

Tabela 8: Podaki o meritvah osvetljenosti v oblačnem vremenu

Datum in čas	18.04.2017 ob 12:00
Geografska lega	46°02'53"N, 14°32'46.86"E
Vremenske razmere	Oblačno
Namen prostora	Pisarna
Dimenzija prostora (š/d/v)	6,6 m/8,4 m/3m



Slika 24: Oblačno nebo



Slika 25: Pogled na merjeni prostor iz zunanosti (levo) in merjeni prostor (desno)

Referenčne točke sem po prostoru razporedil na oddaljenosti 0,5 m, oz. 1 m (vidno v tabeli).

Tabela 9: Horizontalna osvetljenost na dan 18.4.2017 [lx]

	a (0,5m)	b (1m)	c (2m)	d (3m)	e (4m)	f (5m)	g (5,5m)	h (6m)
1 (0,5m)	480	515	560	640	620	805	887	1035
2 (1m)	210	213	275	270	360	510	640	1060
3 (1,5m)	75	86	103	115	148	240	350	960
4 (2m)	62	73	90	115	145	200	330	870
5 (3m)	52	55	75	90	120	230	440	1040
6 (4m)	37	43	50	58	74	112	210	640
7 (5m)	48	60	66	78	118	180	370	720
8 (6m)	38	44	48	54	80	130	236	540
9 (7m)	42	44	52	55	80	110	150	510
10 (8m)	30	42	49	65	88	152	280	720

Tabela 10: Vrednost KDS faktorja (%) na dan 18.4.2017

	a (0,5m)	b (1m)	c (2m)	d (3m)	e (4m)	f (5m)	g (5,5m)	h (6m)
1 (0,5m)	2,73	2,93	3,18	3,64	3,52	4,57	5,04	5,88
2 (1m)	1,19	1,21	1,56	1,53	2,05	2,90	3,64	6,02
3 (1,5m)	0,43	0,49	0,59	0,65	0,84	1,36	1,99	5,45
4 (2m)	0,35	0,41	0,51	0,65	0,82	1,14	1,88	4,94
5 (3m)	0,30	0,31	0,43	0,51	0,68	1,31	2,50	5,91
6 (4m)	0,21	0,24	0,28	0,33	0,42	0,64	1,19	3,64
7 (5m)	0,27	0,34	0,38	0,44	0,67	1,02	2,10	4,09
8 (6m)	0,22	0,25	0,27	0,31	0,45	0,74	1,34	3,07
9 (7 m)	0,24	0,25	0,30	0,31	0,45	0,63	0,85	2,90
10 (8m)	0,17	0,24	0,28	0,37	0,50	0,86	1,59	4,09

Vrednosti količnika dnevne svetlobe (KDS) so izražene kot razmerje med neovirano osvetljenostjo v prostoru in neovirano osvetljenostjo zunanje točke na strehi objekta, izraženo v %. KDS določamo le v primeru oblačnega neba. KDS v primerjavi s samo vrednostjo v luksih podaja precej bolj enakovredno vrednost. Povprečna vrednost KDS-a je znašala 1,54 %.

Primerjava s standardi:

- **SIST DIN 5034 – 1:1997, Dnevna svetloba v notranjih prostorih - Splošne zahteve:**

Ustrezna osvetlitev prostora z dnevno svetlobo je dosežena kadar znaša izmerjena srednja vrednost KDS 0,9 %, če ga merimo v horizontalni referenčni ravnini (0,85 m nad tlemi, v polovici globine prostora in na oddaljenosti 1m od stranskih sten in najmanj 0,75% na najneugodnejši referenčni točki).

- **BS 8206-2:2008, Lighting for buildings. Code of practice for daylighting:**

V primeru ko se tekom dneva za osvetljevanje lahko izkorišča samo naravna svetloba, naj bo vrednost KDS najmanj 5%, v primeru kombinacije z umetno razsvetljavo pa mora biti vrednost KDS najmanj 2%.

- **CIBSE (Chartered Institution of Building Services Engineers) Guidelines (Phillips, 2004)**

Tabela 11: CIBSE standard za vrednosti KDS

	povprečni KDS [%]	minimalni KDS [%]
pisarne	5 %	2,5 %
avla, recepcija	2,5 %	0,6 %

- **LEED: 2.1. Daylight requirement:**

Priporočena vrednost minimalnega KDS na 75 % površine na katerih se ljudje zadržujejo večji del dneva je 2%.

- **ISO/CIE 8995-1:2002 Lighting work places – Part 1: Indoor:**

V notranjosti KDS ne sme pasti pod 1% na višini delovne ravnine 3 m od stene z oknom in 1 m od stranske stene.

Izmerjene vrednosti z izračuni KDS za naš primer dnevnega osvetljevanja kažejo, da minimalne vrednosti KDS navedene v standardih niso nikoli bile dosežene. Z naravno svetlobo ni v nobenem od naštetih standardov dosežen minimalni KDS. Naša izmerjena povprečna vrednost je namreč znašala le 1.54 %. Razlog so zelo umazana okna z nizko transmistivnostjo (zaradi neobratovanja stavbe), pribite deske tik pod stropom, rastje, ki nekoliko zastira pogled in neustrezno zasnovan transparentni del ovoja. Ob odstranitvi motečih dejavnikov in čistejših oknih, bi bili rezultati boljši. Je pa dejstvo, da v Slovenski zakonodaji ni predpisana vrednost minimalnega KDS-a. Če je povprečni KDS pod 2% prostor zaznavamo kot premalo osvetljen. Povprečni KDS od 2 do 5% naj bi predstavljal primerno osvetljen prostor. KDS večji od 5% pa pomeni, da je prostor dobro osvetljen večino dneva, razen v zgodnjih urah in poznih popoldnevih [26].

7.1.2 Meritve v jasnem vremenu

Meritve horizontalne osvetljenosti v jasnem vremenu sem opravil na višini oči stoječega človeka, t.j. okrog 130 cm nad tlemi. Vrednost osvetljenosti zunanje neovirane točke je bila 114000 lx. Referenčne točke sem po prostoru razporedil isto kot pri meritvah v oblačnem vremenu.

Tabela 12: Podatki o meritvah osvetljenosti v jasnem vremenu

Datum in čas	29.04.2017 ob 12:00
Geografska lega	46°02'53"N, 14°32'46.86"E
Vremenske razmere	Jasno
Namen prostora	Pisarna
Dimenzija prostora (š/d/v)	6,6 m/8,4 m/3m



Slika 26: Jasno nebo na dan 29.4.2017



Slika 27: Pogled na merjeni prostor iz zunanosti (levo), merjeni prostor (desno) na dan 29.4.2017

Tabela 13: Horizontalna osvetljenost v lx na dan 29.4.2017

	a (0,5m)	b (1m)	c (2m)	d (3m)	e (4m)	f (5m)	g (5,5m)	h (6m)
1 (0,5m)	1850	2580	2200	2450	2720	2520	2410	2340
2 (1m)	806	890	1070	1060	1160	1120	1280	1350
3 (1,5m)	730	804	860	890	920	955	1108	1265
4 (2m)	550	660	720	730	870	905	1085	1120
5 (3m)	352	402	490	560	606	780	905	1054
6 (4m)	283	316	366	402	508	720	864	1025
7 (5m)	222	242	285	340	440	563	648	770
8 (6m)	185	202	226	245	320	470	625	710
9 (7m)	148	185	220	237	290	382	375	350
10 (8m)	120	172	210	213	310	480	605	770

Z oranžno barvo sta obarvani vrednosti, ki sta nekoliko nižji zaradi vpliva stebra. Glede na vrednosti iz spodnje tabele (tabela 14), ki jih navaja SIST EN 12464-1:2011 za območje uradov in pisarn, kjer so bistvene dejavnosti pisanje, tipkanje, branje in obdelava podatkov, lahko ugotovimo da priporočenim vrednostim zadošča 60% prostora. Od izbranih 80 referenčnih točk je bila namreč vrednost višja od 500 lx v 48-ih točkah (obarvane z modro barvo), v 32 pa je bila ta vrednost nižja (obarvane z rdečo

barvo+oranžna). Najvišja vrednost je bila 2720 lx, najnižja pa 120 lx. Ob oknu se torej pojavi tudi bleščanje, saj so vrednosti nad 2000 lx. Glede na to, da so bile meritve izvedene v jasnem vremenu in da je prostor južno orientiran ter ima 2 skoraj v celoti transparentni steni (z izjemo parapeta) bi pričakoval višje vrednosti. Razlog gre ponovno iskati v zelo nizki transmitivnosti umazanih oken (zaradi neobratovanja stavbe), pribitih deskah tik pod stropom in rastju pred zunanjo fasado, ostali razlogi so pomanjkljiva zasnova transparentnega dela ovoja. Ob ureditvi zgoraj naštetih pomanjkljivosti bi bile vrednosti najbrž višje.

Tabela 14: Priporočene vrednosti za urade in pisarne, primerjava s standardom [27]

Skl.št.	Vrsta območja, vidne naloge ali dejavnosti	$\bar{E}_{vz}$ (lx)	UGR_m —	U_o —	R_a —	Posebne zahteve
5.26.1	Dostava, kopiranje itd.	300	19	0,40	80	
5.26.2	Pisanje, tipkanje, branje, obdelava podatkov	500	19	0,60	80	Delo pri slikovnih zaslonih, glej 4.9
5.26.3	Tehnično risanje	750	16	0,70	80	
5.26.4	Delovna mesta za računalniško podprto načrtovanje (CAD)	500	19	0,60	80	Delo pri slikovnih zaslonih, glej 4.9
5.26.5	Konferenčni prostori, sejne sobe	500	19	0,60	80	Razsvetljavo naj bo mogoče krmiliti.
5.26.6	Sprejemni pult recepcije	300	22	0,60	80	
5.26.7	Arhivi	200	25	0,40	80	

Tabela 15: Vrednost RO_j na dan 29.4.2017

	a (0,5m)	b (1m)	c (2m)	d (3m)	e (4m)	f (5m)	g (5,5m)	h (6m)
1 (0,5m)	1,62	2,26	1,93	2,15	2,39	2,21	2,11	2,05
2 (1m)	0,71	0,78	0,94	0,93	1,02	0,98	1,12	1,18
3 (1,5m)	0,64	0,71	0,75	0,78	0,81	0,84	0,97	1,11
4 (2m)	0,48	0,58	0,63	0,64	0,76	0,79	0,95	0,98
5 (3m)	0,31	0,35	0,43	0,49	0,53	0,68	0,79	0,92
6 (4m)	0,25	0,28	0,32	0,35	0,45	0,63	0,76	0,90
7 (5m)	0,19	0,21	0,25	0,30	0,39	0,49	0,57	0,68
8 (6m)	0,16	0,18	0,20	0,21	0,28	0,41	0,55	0,62
9 (7m)	0,13	0,16	0,19	0,21	0,25	0,34	0,33	0,31
10 (8m)	0,11	0,15	0,18	0,19	0,27	0,42	0,53	0,68

Vrednosti razmerja osvetljenosti (RO_j) so izražene kot razmerje med neovirano osvetljenostjo v prostoru in neovirano osvetljenostjo na strehi, izraženo v %. V primeru jasnega neba razmerje osvetljenosti označimo z RO_j .

7.2 Meritve hitrosti gibanja zraka

S pomočjo študentov iz Fakultete za strojništvo smo izvedli tudi meritve hitrosti gibanja zraka v prezračevalnem kanalu. Pomagali smo si z areo-anemometrom, ki je bil opisan v poglavju o merilni opremi.

Da bi ugotovili ali sistem dvojne fasade sploh funkcionira, torej ali se prezračuje s pomočjo naravne konvekcije, smo morali najprej izmeriti hitrost zraka v primeru zaprtih loput in nato rezultate primerjati s hitrostjo gibanja zraka pri odprtih loputih. Sistem dvojne fasade ima spodaj lopute za zajem zraka in pri vrhu lopute za odvod zraka.

Hitrost gibanja zraka smo merili v vertikalni smeri, merilnik, ki ima na koncu merilca zelo občutljivo žičko, pa nam je podal hitrost zraka v enotah m/s in njegovo temperaturo v °C.



Slika 28: Lopute za zajem (levo) in odvod zraka (desno)



Slika 29: Prostor za zajem svežega zraka

V vsakem nadstropju smo izvedli 72 meritev. Za vsako smer neba smo namreč izvajali meritve na 18 mestih (ob vsakem oknu). Na višini okenske police in na sredini zračnega prostora 0,35 m od okenske police smo merili hitrost. Meritev je trajala 10 sekund zato, da smo dobili povprečno hitrost. V spodnjih tabelah so prikazane povprečne vrednosti hitrosti, temperature zraka v prezračevalnem kanalu in temperature zraka notranjih prostorov. Vse meritve smo namreč sešteli ter jih delili s številom meritev.

7.2.1 Izvajanje meritev z zaprtimi spodnjimi in zgornjimi loputami

Meritve smo izvajali 14.6.2017 okoli 12. ure (poldan), povprečna temperatura zunanjega zraka pa je znašala 16 °C.

Tabela 16: Hitrosti in temperature zraka za 1. in 2. nadstropje pri zaprtih loputah na dan 14.6.2017

1. nadstropje	$\bar{v}$ [m/s]	$\bar{T}_{DF}$ [°C]	$\bar{T}_P$ [°C]
J	0,11	20,6	16,0
Z	0,11	20,3	16,8
S	0,07	15,5	13,8
V	0,06	14,6	13,8
2. nadstropje			
J	0,07	19,9	17,4
Z	0,08	20,9	16,5
S	0,09	17,4	14,4
V	0,06	16,2	15,4

Kjer je :

- $\bar{T}_{DF}$ - povprečna temperatura zraka v dvojni fasadi [°C]
- $\bar{T}_P$ - povprečna temperatura zraka notranjih prostorov [°C]
- $\bar{v}$ - povprečna hitrost zraka

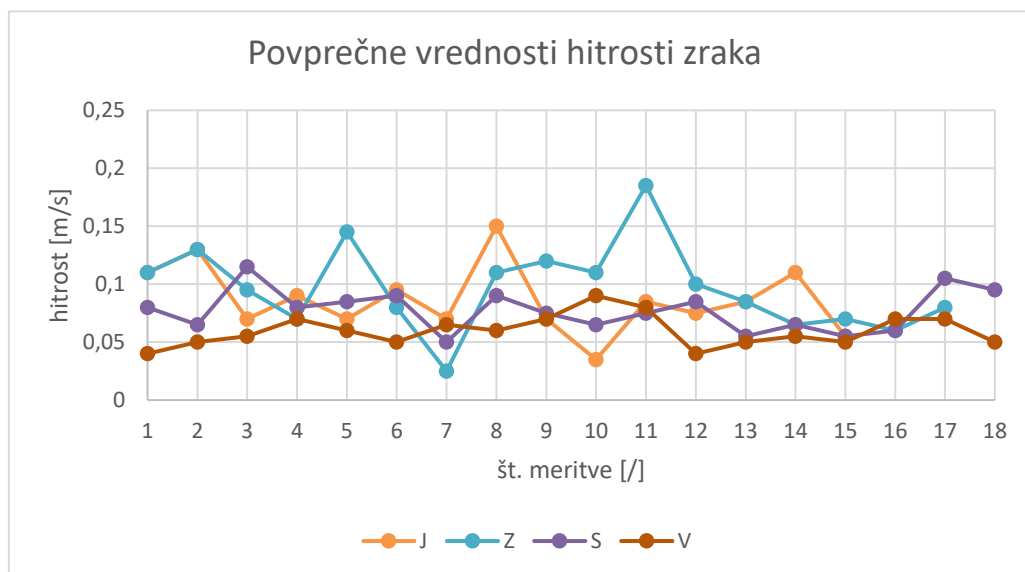
V zgornji tabeli je razvidno da pri zaprtih loputah zrak praktično miruje. Hitrosti so nekoliko večje na J in Z fasadi v prvem nadstropju, medtem ko so hitrosti v drugem nadstropju relativno podobne za vse smeri neba. Gibljejo se med 0,06 in 0,11 m/s, kar je idealno saj se zrak lahko v zimskih mesecih ogreje in tako posredno ogreva notranje prostore. Temperature so nekoliko višje na J in Z fasadi, kar je pričakovano, saj S fasada ne dobi veliko direktne sončne komponente, V pa je v veliki meri osenčena zaradi bližine trgovine Lidl. Kar se samih hitrosti tiče so bile le-te nekoliko višje v 1. nadstropju.

Tabela 17: Povprečna vrednost hitrosti in temperatur zraka pri zaprtih loputah na dan 14.6.2017

Smer neba	$\bar{v}$ [m/s]	$\bar{T}_{DF}$ [°C]	$\bar{T}_P$ [°C]
J	0,09	20,2	16,7
Z	0,10	20,6	16,7
S	0,08	16,5	14,1
V	0,06	15,4	14,6

Kjer je :

- $\bar{T}_{DF}$ - povprečna temperatura zraka v dvojni fasadi [°C]
- $\bar{T}_P$ - povprečna temperatura zraka notranjih prostorov [°C]
- $\bar{v}$ - povprečna hitrost zraka



Grafikon 4: Prikaz povprečnih vrednosti hitrosti zraka na dan 14.6.2017 [m/s]

Rezultati meritev so pokazali, da zrak pri zaprtih loputah praktično miruje, kar je pričakovano in česar smo si tudi želeli. V povprečju so bile največje vrednosti na J in Z delu stavbe.

Ugotovili smo tudi, da je največja vrednost hitrosti zraka na J delu fasade na sredini prezračevalnega kanala, najmanjša pa tik ob okenski polici. Na Z delu fasade pa so bile te vrednosti nekoliko drugačne. Največja vrednost se je namreč pojavila bližje zunanjemu robu dvojne fasade (0,58 m od okna). Razlog gre iskati v bregu poraslim z rastlinjem, ki se nahaja na zahodnem delu fasade ter v okrivljenih loputah, ki se jih ni dalo popolnoma zapreti.

7.2.2 Izvajanje meritev z odprtimi spodnjimi in zgornjimi loputami

Sledil je postopek meritev z odprtimi spodnjimi in zgornjimi loputami. Že tu se je pojavil problem, saj se vseh loput ni dalo odpreti. Nekatere so namreč zvite, zarjavele ali pa jih sploh ni. Nekje so ob loputah postavljene zunanje enote klimatskih naprav, ki v poletnih mesecih pripomorejo k dodatnem segrevanju zraka v prezračevalnem kanalu dvojne fasade oz. onemogočajo odpiranje samih loput.

Delovanje dvojne fasade in v povezavi s tem hitrost gibanja zraka v prezračevalni coni je neposredno povezana z vremenom. V sončnem vremenu je namreč učinek termičnega vzgona zaradi višje temperature v votlini večji. Zato smo s študenti iz Fakultete za strojništvo UL meritve izvedli takrat, ko je bilo vreme celoten čas meritev sončno.

Če želimo da se stavba prezračuje s pomočjo naravne konvekcije morajo biti vrednosti hitrosti zraka bistveno večje kot smo jih namerili pri zaprtih loputah. Hitrosti zraka bi se morale gibati v območju 2-3 m/s.

Meritve smo izvajali isti dan, torej 14.6.2017 okoli 16 ure popoldan, povprečna temperatura zunanjega zraka pa je znašala 21,6 °C.



Slika 30: Zaprte (levo) in odprte (desno) zgornje lupute na V fasadi



Slika 31: Zaprte (levo) in odprte (desno) zgornje lopute na S fasadi

Tabela 18: Hitrosti in temperature zraka za 1. in 2. nadstropje pri odprtih loputah na dan 14.6.2017

1. nadstropje	$\bar{v}$ [m/s]	$\bar{T}_{DF}$ [°C]	$\bar{T}_P$ [°C]
J	0,12	33,3	26,7
Z	0,19	37,8	23,6
S	0,17	30,6	23,3
V	0,14	28,0	25,0
2. nadstropje			
J	0,23	34,5	26,8
Z	0,22	36,0	26,5
S	0,16	29,5	23,3
V	0,15	31,0	24,4

Kjer je :

- $\bar{T}_{DF}$ - povprečna temperatura zraka v dvojni fasadi [°C]
- $\bar{T}_P$ - povprečna temperatura zraka notranjih prostorov [°C]
- $\bar{v}$ - povprečna hitrost zraka

V zgornji preglednici je vidno, da so hitrosti, kljub odprtim loputam in pričakovanem močnejšem strujanju zraka zaradi naravne konvekcije, še vedno relativno nizke. Zaradi višjih temperatur in posledično močnejšega učinka termičnega vzgona v votlini, bi se morale hitrosti gibati okrog 2-3 m/s. Izmerjene vrednosti pa so bile v našem primeru več kot 10 krat manjše.

Hitrost z višino sicer nekoliko narašča, kar smo tudi pričakovali, vendar bistvene razlike razen na J fasadi ni.

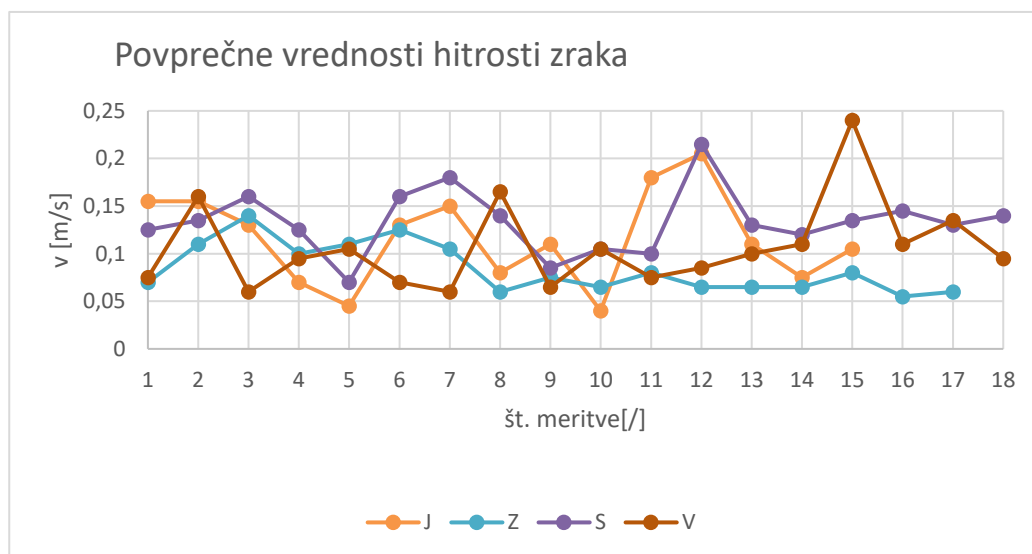
Temperature v prezračevalnem kanalu so nekoliko višje, kot v primeru zaprtih loput (v povprečju za 10°C). V povprečju se gibajo okrog 33°C in 34°C. Upoštevati je seveda treba višjo zunanjo temperaturo v času opravljanja meritev z odprtimi loputami v primerjavi s temperaturo pri zaprtih loputah. Zaradi relativno majhne hitrosti zraka v votlini se zrak v njej pregreva. Posledično greje tudi notranje prostore, kar večja potrebo po ohlajanju le-teh.

Tabela 19: Povprečne vrednosti hitrosti in temperatur zraka pri odprtih loputah na dan 14.6.2017

Smer neba	$\bar{v}$ [m/s]	$\bar{T}_{DF}$ [°C]	$\bar{T}_P$ [°C]
J	0,18	33,9	26,8
Z	0,21	36,9	25,1
S	0,16	30,1	23,3
V	0,14	29,5	24,7

Kjer je :

- $\bar{T}_{DF}$ - povprečna temperatura zraka v dvojni fasadi [°C]
- $\bar{T}_P$ - povprečna temperatura zraka notranjih prostorov [°C]
- $\bar{v}$ - povprečna hitrost zraka



Grafikon 5: Prikaz povprečnih vrednosti hitrosti zraka pri odprtih loputah na dan 14.6.2017 [m/s]

Kot vidimo iz grafa povprečnih vrednosti so najvišje hitrosti na zahodni in južni strani. To je povsem pričakovano, saj so omenjeni fasadi najbolj osončeni in je naravna konvekcija tukaj najbolj izražena (pričakoval bi da bodo vrednosti na J delu fasade zaradi direktne sončne komponente višje kot na Z). Kot je bilo opisano že za primer zaprtih loput S fasada namreč ne dobi veliko direktne sončne komponente, V pa je v veliki meri osenčena zaradi bližine trgovine Lidl. Vendar so kljub vsemu hitrosti še vedno premajhne, da bi vse skupaj delovalo, saj bi se morale hitrosti gibati okoli 2-3 m/s kot je predpisano in lahko zaradi tega v poletnih mesecih pričakujemo pregrevanje notranjih prostorov.

7.2.3 Izvajanje meritev z odprtimi spodnjimi in zgornjimi loputami v oblačnem vremenu

Da bi preverili kakšen je učinek termičnega vzgona in koliko na same vrednosti vpliva vreme, smo meritve izvedli še v oblačnem vremenu, in sicer 20.6.2017 okoli tretje ure popoldan. Pričakovali smo, da bodo hitrosti vetra zaradi odsotnosti sončnega sevanja manjše.

Tabela 20: Hitrosti in temperatura zraka pri odprtih loputah pri oblačnem vremenu na dan 20.6.2017

1. nadstropje	$\bar{v}$ [m/s]	$\bar{T}_{DF}$ [°C]	$\bar{T}_P$ [°C]
J	0,09	17,2	16,4
Z	0,07	16,9	16,3
S	0,14	16,0	16,3
V	0,10	16,1	16,5
2. nadstropje			
J	0,11	17,0	16,8
Z	0,11	16,7	17,2
S	0,11	16,1	15,9
V	0,10	15,9	16,1

Kjer je :

- $\bar{T}_{DF}$ - povprečna temperatura zraka v dvojni fasadi [°C]
- $\bar{T}_P$ - povprečna temperatura zraka notranjih prostorov [°C]
- $\bar{v}$ - povprečna hitrost zraka

Kot vidimo so vrednosti hitrost zraka nižje kot v primeru sončnega vremena. Vrednosti se gibajo okrog 0,10 m/s, torej v povprečju skoraj dva krat manj kot v sončnem vremenu. Povprečna hitrost zraka in temperatura zraka v prezračevalnem kanalu sta dokaj konstantni in ne odstopata bistveno v odvisnosti od smeri neba. Kot sem že omenil smo pričakovali da bodo vrednosti manjše saj je naravna konvekcija odvisna od količine sončnega sevanja. Kljub vsemu so vrednosti vseeno prenizke.

7.3 Ostale meritve izbranih parametrov kakovosti notranjega okolja

7.3.1 Meritve hrupa

Naš objekt spada v III. območje varstva pred hrupom (območju družbene infrastrukture: površine za vzgojo, izobraževanje, šport, zdravstvo, kulturo, javno upravo in opravljanje verskih obredov). Okoljska mejna raven zunanje hrupa za 3. območje je 60 dB po Pravilniku o zvočni zaščiti stavb, pri nas po je

bila izmerjena vrednost 50 dB (izmerili smo jo 21.3.2017 ob 14:00). Mejne vrednosti hrupa v notranjih prostorih so za stanovanja in učilnice oz. predavalnice 35 dB po Pravilniku o zvočni zaščiti stavb, pri nas pa je bila izmerjena vrednost 30 dB (izmerili smo jo 21.3.2017 ob 14:00), kar je znotraj priporočil.

7.3.2 Meritve temperature zraka in površin

Povprečna temperatura zraka v prostoru je znašala 14,2°C (datum meritve: 21.3.2017, zunanja temperatura je bila 18,5 °C). Izmeril sem še temperaturo obodnih površin, in sicer sem za strop, tla ter S, V in Z steno izbral 6 točk v katerih sem izmeril površinsko temperaturo. Pri tem sem pazil na vrednosti emisivnosti materialov, ki sem jih spreminjal z merilcem. Povprečne vrednosti so bile sledeče: strop-8,1 °C, tla-4,9 °C, S stena-7,7 °C, V stena-10,5 °C. Zavedati pa se je tudi potrebno, da je bil prostor v času meritev neogrevan oz. na splošno v neobratovalni fazi.

7.3.3 Meritve relativne vlažnosti zraka

V prostoru smo izmerili relativno vlažnost zraka, ki znaša 62%. Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb predvideva dopustne relativne vlažnosti med 30% in 70% pri temperaturi prostora med 20 in 26 °C. Prostor je bil v času meritev neogrevan oz. na splošno v neobratovalni fazi.

8 SIMULIRANJE RABE ENERGIJE S PROGRAMSKIM ORODJEM DESIGNBUILDER

8.1 Splošno

DesignBuilder je računalniški program, ki ponuja napredna orodja za modeliranje v dokaj preprostem vmesniku. Z njegovo pomočjo lahko razvijamo udobne in energijsko učinkovite stavbne zasnove od koncepta do zaključka. Izdelalo ga je podjetje DesignBuilder Software Ltd.

Program se med drugim uporablja za oceno možnosti pregrevanja fasade, rabe energije in parametrov senčenja, ocenjevanje optimalne uporabe dnevne svetlobe, modeliranja sistemov za nadzor razsvetljave in določanje prihrankov električne energije, toplotnih simulacijah v zgradbah, ki so prezračevane z naravnim prezračevanjem, določanje zmogljivosti oz. moči opreme za ogrevanje in hlajenje, ki vključuje simulacijo in projektiranje HVAC sistemov [28].

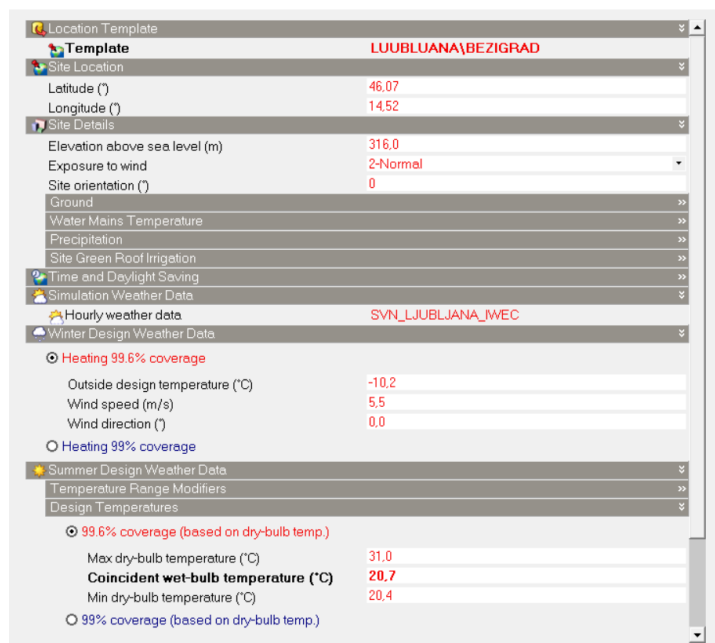
Mnoge univerze uporabljajo program pri modeliranju energetike v objektih in simulacijah.

V kombinaciji s programom DesignBuilder se uporablja tudi program EnergyPlus. EnergyPlus je odprtokodni program za energijsko simulacijo stavbe. Uporabljajo ga inženirji, arhitekti in raziskovalci za izračun rabe energije (za ogrevanje, hlajenje, prezračevanje, razsvetljavo) in porabe vode v stavbah. Gre za, to da EnergyPlus nima svojega grafičnega vmesnika in z njim ne moremo modelirati objekta. To delo opravimo z DesignBuilder-jem.

Glavni namen uporabe tega programa je bil v našem primeru izračun potrebne energije za ogrevanje in hlajenje v obravnavanem prostoru ter izračun izbranih parametrov kakovosti notranjega okolja.

8.2 Vhodni podatki za izvedbo analize

Pred pričetkom uporabe samega programa sem naprej določil lokacijo, in sicer Ljubljana, Bežigrad, ki je najbližja možna naši lokaciji, ki jo podaja program. Določil je geografsko širino $46,07^\circ$ in geografsko dolžino $14,52^\circ$, nadmorsko višino 316 m in normalno izpostavljenost vetru. Tako bo program vključil klimatske podatke iz tega področja. Pomembna je predvsem zunanja projektna temperatura na podlagi katere bo program izračunal toplotne izgube oz. dobitke našega prostora.



Slika 32: DesignBuilder-podatki o lokaciji

V zavihku »activity« je bilo treba najprej določiti za kakšen prostor gre. V našem objektu smo imeli 2 možnosti, saj je šlo bodisi za pisarniški prostor, bodisi za prezračevalno votlino dvojne fasade. Na podlagi izbranega je nato program določil stopnjo zasedenosti (npr. 0,11 ljudi/m² za pisarne), stopnjo aktivnosti (npr. 0,9 met za lahko pisarniško delo za pisarne), faktor oblečenosti (npr. 1 clo za zimski scenarij in 0,5 clo za poletni scenarij za pisarne), itd.

Pri temperaturi prostora (heating in cooling setpoint temperatures) smo nastavili sledeče vrednosti, in sicer notranjo projektno temperaturo zraka pozimi za ogrevanje na povprečno vrednost 22°C, poleti pa hlajenje na povprečno vrednost 24°C. Stopnja osvetljenosti prostora je postavljena na 400 lx, predpostavljena je pisarniška oprema, ki povzroča sevanje oz. notranje dobitke v vrednosti 11,77 W/m².

Program predpostavi pisarniški urnik, kar pomeni da je delovanje ogrevanja, hlajenja, prezračevanja, pisarniške opreme, razsvetljave in zasedenosti prostora vezano nanj.

Activity Template

Template **Generic Office Area**

Sector: B1 Offices and Workshop businesses

Zone multiplier: 1

☒ Include zone in thermal calculations

☒ Include zone in Radiance daylighting calculations

Building Total Floor Areas

Occupancy

Density (people/m²): 0,1100

Schedule Office_OpenOff_Occ

Metabolic

Activity: Light office work/Standing/Walking

Factor (Men=1.00, Women=0.85, Children=0.75): 0,90

CO₂ generation rate (m³/s-W): 0,000000382

Clothing

Winter clothing (clo): 1,00

Summer clothing (clo): 0,50

Holidays

DHW

Environmental Control

Heating Setpoint Temperatures

Heating (°C): 22,0

Heating set back (°C): 12,0

Cooling Setpoint Temperatures

Cooling (°C): 24,0

Cooling set back (°C): 28,0

Humidity Control

Ventilation Setpoint Temperatures

Natural Ventilation

☒ Indoor min temperature control

Min temperature definition: 1-By value

Min temperature (°C): 24,0

Minimum Fresh Air

Fresh air (l/s-person): 10,000

Mech vent per area (l/s-m²): 0,000

Lighting

Target Illuminance (lux): 400

Default display lighting density (W/m²): 0

Computers

☐ On

Office Equipment

☒ On

Gain (W/m²): 11,77

Schedule Office_OpenOff_Equip

Radiant fraction: 0,200

Slika 33: DesignBuilder-podatki o aktivnosti in notranji projektni temperaturi za ogrevanje in hlajenje

V zavihku HVAC (heating, ventilating, air conditioning and cooling) smo določili, da gre v objektu za daljinsko ogrevanje, hlajenje z elektriko iz omrežja, prostor pa se naravno prezračuje. Naravno prezračevanje sem kasneje v analizah nekoliko spreminjal, in sicer bodisi predpostavljeno prezračevanje (scheduled) s konstantnimi tremi izmenjavami zraka na uro (3 ac/h), bodisi prezračevanje z računsko metodo (calculated). Pri računski metodi se naravno prezračevanje in infiltracijski pretok izračunavata na podlagi velikosti odpiranja odprtín in razpok, vzgona in tlaka vetra. Prav zaradi tega je analiza precej bolj kompleksa in tudi časovno zamudna, a naj bi dajala bolj realne rezultate. Kot bomo videli se

vrednosti pri različnih metodah razlikujejo. Za prezračevanje v prostorih smo predpostavili, da je prisotno vedno, prezračevanje v votlini pa je prisotno samo včasih, odvisno od potrebe analize. Več bo opisano v poglavju 8.3 z naslovom Modeli.

The image displays two panels from the DesignBuilder software interface, showing HVAC and DHW (Domestic Hot Water) settings.

HVAC Template Panel:

- Template:** Fan-coil unit
- Mechanical Ventilation:** On
- Auxiliary Energy:**
 - Pump etc energy (W/m2): 0.0000
 - Schedule: Office_OpenOff_Occ
- Heating:**
 - Heated:** (checked)
 - Fuel: 2-Natural Gas
 - Heating system CoP: 0.830
 - Type: (empty)
 - Operation: (empty)
 - Schedule: Office_OpenOff_Heat
- Cooling:**
 - Cooled:** (checked)
 - Fuel: 1-Electricity from grid
 - Cooling system CoP: 1.670
 - Supply Air Condition: (empty)
 - Operation: (empty)
 - Schedule: Office_OpenOff_Cool
- Humidity Control:** (empty)

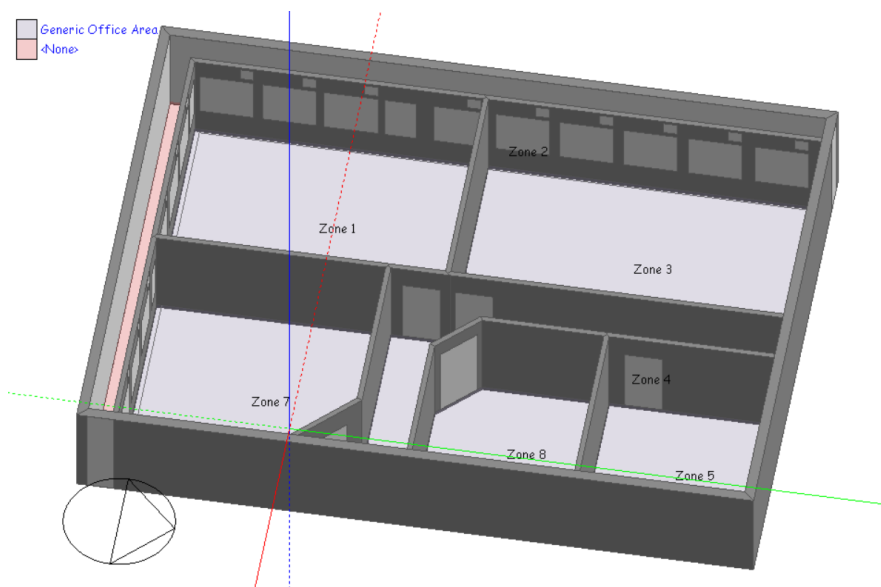
DHW Panel:

- On:** (checked)
- DHW Template:**
 - Type: 4-Instantaneous hot water only
 - DHW CoP: 0.8500
 - Fuel: 1-Electricity from grid
 - Water Temperatures:
 - Delivery temperature (°C): 65.00
 - Mains supply temperature (°C): 10.00
 - Operation: (empty)
 - Schedule: Office_OpenOff_Occ
- Natural Ventilation:**
 - On:** (checked)
 - Outside air definition method: 1-By zone
 - Outside air (ac/h): 3,000 (with a slider bar from 0 to 12)
 - Operation: (empty)
 - Schedule: Office_OpenOff_Occ
 - Delta T Limits: (empty)
 - Mixed Mode Zone Equipment: (empty)
- Air Temperature Distribution:**
 - Distribution mode: 1-Mixed

Slika 34: DesignBuilder-podatki o HVAC nastavitvah

Nato je bilo treba zmodelirati omenjen prostor s pripadajočimi dimenzijami. Model sem razdelil v 3 pod-modele oz. 3 block-e, lahko bi rekli 3 etaže. S tem sem želel ustvariti podobno stanje, kot na našem konkretnem objektu. Obravnavan prostor je namreč v drugi etaži in ima nad ter pod seboj kondicionirano cono (tla oz. strop torej ne mejita na zunanji neogrevan prostor). Seveda to velja tudi za 2 notranji steni (vzhodna in severna), ki prav tako mejita na 3 ogrevane notranje prostore. Vse etaže (block 1, block 2 in block 3) sem definiral kot generic office area, kjer potekajo klasična pisarniška dela. Zgornja 2 sem

nato razdelil še na podprostore oz. cone (partitions), ki sem jih ločil z vrati. Najpomembnejši del modela pa je bila seveda prezračevalna votlina, ki sem ga posebej definiral kot cavity zone (obarvan roza). Na spodnji sliki je vidna razdelitev »blocka« oz. naše etaže. Prostor ki ga bomo analizirali v nadaljevanju je cona 1, na sliki 35 označen kot »Zone 1«.



Slika 35: Block 2 s pripadajočimi conami

Konstruktivske sklope za vnos v program sem definiral na sledeč način in sovpadajo dejanski sestavi:

- Zunanja stena (stena proti neogrevanemu prostoru):

Tabela 21: Konstrukcijski sklop zunanje stene

Sloji v konstrukciji	Debelina gradbene konstrukcije [cm]	Toplotna prevodnost [W/(mK)]	Toplotna prehodnost [W/(m²K)]
Osnovni omet	0,3	0,87	0,623
Steklena volna	5	0,04	
Betoni s kam. agregati (2500)	18	2,33	
Osnovni omet	0,3	0,87	

- Notranja stena:

Tabela 22: Konstrukcijski sklop notranje stene

Sloji v konstrukciji	Debelina gradbene konstrukcije [cm]	Toplotna prevodnost [W/(mK)]	Toplotna prehodnost [W/(m²K)]
Osnovni omet	2	0,87	0,615
Steklena volna	5	0,04	
Betoni s kam. agregati (2500)	18	2,33	
Osnovni omet	0,3	0,87	

- Medetažna konstrukcija:

Tabela 23: Konstrukcijski sklop medetažne konstrukcije

Sloji v konstrukciji	Debelina gradbene konstrukcije [cm]	Toplotna prevodnost [W/(mK)]	Toplotna prehodnost [W/(m²K)]
Zaključni sloj (tekstil)	2	0,06	0,213
Cementni estrih	7	1,4	
XPS KI Polyfoam C-ULTRAGRIP d =20 - 40 mm	12	0,03	
Polimer bitumenska HI	1,3	0,19	
Betonski elementi (2500)	18	2,33	

- Streha:

Tabela 24: Konstrukcijski sklop strehe

Sloji v konstrukciji	Debelina gradbene konstrukcije [cm]	Toplotna prevodnost [W/(mK)]	Toplotna prehodnost [W/(m²K)]
Pohodne plošče	1	3,5	0,286
Naklonski beton	3	0,2	
XPS KI Polyfoam C-350 d = 30 - 40 mm	10	0,033	
Polimer bitumenska HI	1,3	0,19	
Betoni s kam. agregati (2500)	18	2,33	
Osnovni omet	0,3	0,87	

- Tla na terenu:

Tabela 25: Konstruktivski sklop tal na terenu

Sloji v konstrukciji	Debelina gradbene konstrukcije [cm]	Toplotna prevodnost [W/(mK)]	Toplotna prehodnost [W/(m²K)]
Cementni estrih	7	1,4	0,219
HOR. DOL, d=1cm	1	0,07	
XPS KI Polyfoam C- ULTRAGRIP d =20 - 40 mm	12	0,03	
Polimer bitumenska HI	1,3	0,19	
Betonski elementi (2500)	10	2,33	
Gramozno nasutje	20	1,4	

Pri zasteklitvi sem definiriral 2 vrsti stekel. Zunanja fasada predstavlja kaljeno steklo s toplotno prehodnostjo 10,185 W/(m²K), notranja fasada pa je zastekljena z enostavnimi dvoslojnimi okni z lesenim okvirjem s toplotno prehodnostjo 1,5 W/(m²K). Pri transparentnih površinah je poleg toplotne prehodnosti zelo pomembna tudi sama transmitivnost zasteklitve. Kot že omenjeno je bila ta na oknih našega objekta zelo nizka. Naj še enkrat omenim meritve:

- Oblačno vreme: vrednost tik ob fasadi z zunanje strani-12600 lx, v medprostoru (prezračevalni kanal)-3250 lx in v notranjosti prostora tik ob notranji fasadi oz. oknu-1520 lx; transmitivnost zunanje zasteklitve torej 0,26; notranje 0,47.
- Sončno vreme: vrednost tik ob fasadi z zunanje strani-137100 lx, v medprostoru (prezračevalni kanal)-42240 lx in v notranjosti prostora tik ob notranji fasadi oz oknu-24600 lx; transmitivnost zunanje zasteklitve torej 0,31; notranje 0,58.

Vrednosti so v primeru sončnega vremena nekoliko višje, a še vedno dokaj primerljive. Za model sem vzel povprečno vrednost transmitivnosti zgornjih vrednosti.

8.3 Modeli

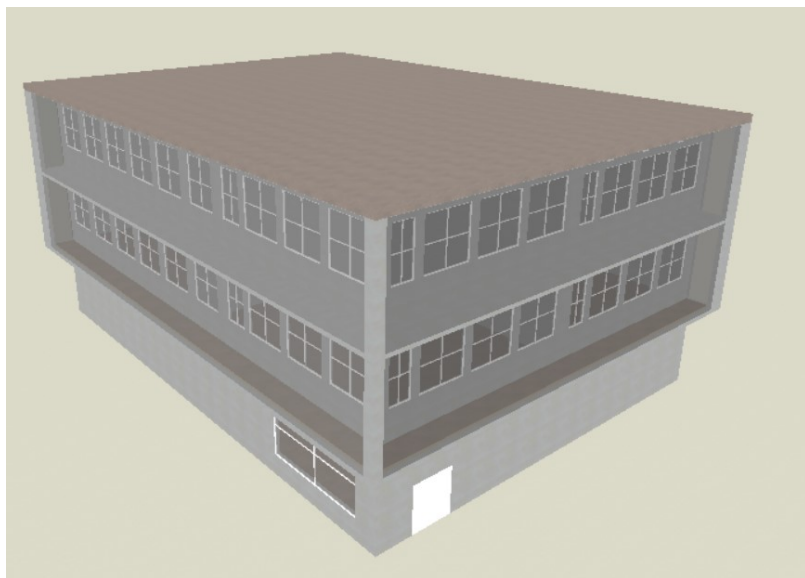
Kot že rečeno sem s pomočjo programskega orodja DesignBuilder zmodeliral 3 možne oblike našega objekta, in sicer:

- model z zaprto dvojno fasado,
- model z odprto dvojno fasado,
- model s klasično enojno fasado.

Vse analize so bile izvede z naravnim prezračevanjem, ki je bilo v prostorih vedno prisotno (tudi v stavbi SOP Krško je bil tak način prezračevanja). Prezračevanje v votlini pa je bilo včasih prisotno, včasih ne.

S tem smo želeli preveriti ali program dejansko upošteva vpliv prezračevanja v votlini na rabo energije in na temperature v prostoru in votlini. Več je opisano v spodnjih analizah. V vseh primerih smo analizirali cono 1, v drugi etaži modela (block 2). Senčila so bila v notranjosti v vseh modelih. Sam prostor je opisan v poglavju 4.3, z naslovom Merilni prostor.

8.3.1 Model z zaprto dvojno fasado

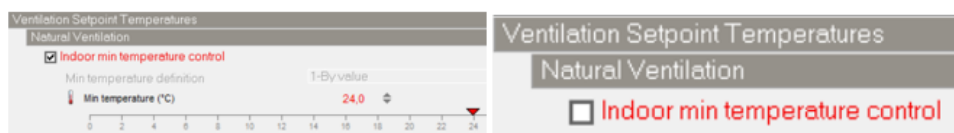


Slika 36: Model z zaprto dvojno fasado

- **Metoda s konstantnim prezračevanjem 3ac/h**

Pri klasičnem izračunu (scheduled) program predpostavi 3ac/h oz. 3 izmenjave zraka na uro.

V kolikor želimo preprečiti prezračevanje v votlini, moramo v programu izključiti prezračevanje in »indoor minimal temperature control« v votlini. Sistem za nadzor prezračevanja v votlini namreč predpostavi, da v kolikor temperatura znotraj votline naraste nad 24 °C sistem avtomatsko požene naravno prezračevanje. To pomaga zagotoviti, da se votlina ne pregreje in tako zmanjšuje potrebo po hlajenju prostorov.



Slika 37: Preprečitev prezračevanja v votlini

Tabela 26: Izračun letnih dobitkov in izgub za primer zaprte dvojne fasade s konstantnim prezračevanjem (3ac/h)-s prezračevanjem v votlini (levo) in brez prezračevanja v votlini (desno)

	Cona (kWh)	(kWh/m ²)		Cona (kWh)	(kWh/m ²)
Energija za ogrevanje	2454	44,30	Energija za ogrevanje	2448	44,19
Energija za hlajenje	2685	48,47	Energija za hlajenje	2735	49,37
Glazing	-733	-13,23	Glazing	-687	-12,40
Ceilings (int)	-677	-12,22	Ceilings (int)	-676	-12,20
Floor (int)	-260	-4,69	Floor (int)	-299	-5,40
Floor (ext)	-62	-1,12	Floor (ext)	-62	-1,12
Partitions	-1447	-26,12	Partitions	-1385	-25,00
Transmisijske izgube skupaj	-3179	-57,38	Transmisijske izgube skupaj	-3109	-56,12
External infiltration	-4145	-74,82	External infiltration	-4152	-74,95
External ventilation	-138	-2,49	External ventilation	-146	-2,64
Prezračevalne izgube	-4283	-77,31	Prezračevalne izgube	-4298	-77,58
Solarni dobitki	503	9,08	Solarni dobitki	503	9,08
Razsvetljava	3471	62,65	Razsvetljava	3471	62,65
Oprema	2388	43,10	Oprema	2388	43,10
Uporabniki	1042	18,81	Uporabniki	1042	18,81
Notranji dobitki skupaj	6901	124,57	Notranji dobitki skupaj	6901	124,57
Primarna energija	389006	551	Primarna energija	389006	551

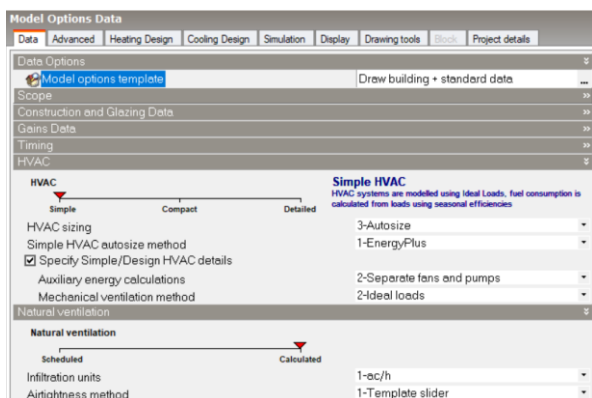
Na podlagi zgornjih vrednosti ugotovimo, da z običajno metodo s konstantnim prezračevanjem praktično ni razlike v rabi energije za ogrevanje ali hlajenje z ali brez prezračevanja v votlini. V obeh primerih so letne vrednosti okrog 44 kWh/(m²a) za ogrevanje in 49 kWh/(m²a) za hlajenje (tudi vrednosti na mesečnem nivoju so praktično identične). Prezračevalne in transmisijske izgube so ravno tako skoraj enake.

Vrednosti notranjih dobitkov so precej visoke. Najbolj izstopa vrednosti pri razsvetljavi, in sicer 62,3 kWh/(m²a) letno. Vidimo da so solarni dobitki izjemno nizki (samo 9,1 kWh/m² letno), kar lahko pripišemo izjemno slabi transmitivnosti oken. Naj dodam, da so bile vrednosti notranjih dobitkov pri vseh sledečih modelih iste, saj smo predpostavili, da so vrednosti zasedenosti, kvalitete osvetljenosti in dela pisarniške opreme vedno iste.

Primarna energija je ogromna, in sicer 551 kWh/(m²a) letno v obeh primerih. Na podlagi zgornjih rezultatov ugotovimo, da program s konstantno metodo prezračevanja ne izračuna razlik v rabi energije v kolikor je prezračevanje v votlini prisotno ali ne.

- **Računska metoda**

Za izračun prezračevanja po računski metodi je treba v HVAC nastavitvah pod rubriko »natural vetilation« odključati možnost »calculated«. Tako program ne bo upošteval konstantnih vrednosti pri pretoku zraka, ampak bo naravno prezračevanje in infiltracijski pretok izračunaval na podlagi odpiranja oken (določeno s pisarniškim urnikom), velikosti razpok, vzgona in tlaka vetra.



Slika 38: Računska metoda izračuna prezračevanja v DesignBuilderju

Tabela 27: Izračun letnih dobitkov in izgub za primer zaprte dvojne fasade z računsko metodo prezračevanja-s prezračevanjem v votlini (levo) in brez prezračevanja v votlini (desno)

	Cona (kWh)	(kWh/m ²)
Energija za ogrevanje	1487	26,84
Energija za hlajenje	3437	62,04
Glazing	-991	-17,89
Ceilings (int)	195	3,52
Floor (int)	53	0,96
Floor (ext)	-70	-1,26
Partitions	-1705	-30,78
Transmisijske izgube skupaj	-2518	-45,45
Internal natural ventilation	-2860	-51,62
External air	-322	-5,81
Prezračevalne izgube	-3182	-57,44
Solarni dobitki	503	9,08
Razsvetljava	3471	62,65
Oprema	2388	43,10
Uporabniki	1042	18,81
Notranji dobitki skupaj	6901	124,57
Primarna energija	321936	456

	Cona (kWh)	(kWh/m ²)
Energija za ogrevanje	2341	42,26
Energija za hlajenje	4818	86,97
Glazing	-780	-14,08
Ceilings (int)	103	1,86
Floor (int)	-99	-1,79
Floor (ext)	-71	-1,28
Partitions	-1396	-25,20
Transmisijske izgube skupaj	-2243	-40,49
Internal natural ventilation	-2682	-48,41
External air	-276	-4,98
Prezračevalne izgube	-2958	-53,39
Solarni dobitki	503	9,08
Razsvetljava	3471	62,65
Oprema	2388	43,10
Uporabniki	1042	18,81
Notranji dobitki skupaj	6901	124,57
Primarna energija	337468	478

Kot vidimo, nam zgornji rezultat da precej različne vrednosti obeh modelov. V kolikor je v votlini prisotno prezračevanje, je potreba po letni količini energija za hlajenje 62 kWh/(m²a), če prezračevanja ni, pa se vrednost poveča na 87 kWh/(m²a). Na letni ravni to razlika znaša 1381 kWh. Ta vednost je že nekoliko bolj smiselna in pričakovana, saj naj bi prezračevanje v votlini dejansko zmanjšalo potrebe po ohlajanju notranjih prostorov.

Pričakovali bi, da bo količina energije za ogrevanje v primeru, ko prezračevanja v votlini ni, manjša, saj bi to pomenilo, da se znotraj votline zrak predgreje in ga je posledično treba pozimi manj ogreti, za dosego željene temperature v notranjosti, prav tako pa so tudi transmisijske in ventilacijske izgube manjše (načeloma je energija za ogrevanje razlika med toplotnimi izgubami in toplotnimi dobitki, pomnoženo s faktorjem izkoristka). Vendar temu v primeru modela ni tako. Ena od možnih razlag zakaj

do tega pride je, da se v primeru prezračevanja pretvorjena sončna energija v toploto iz prostora med steklom in steno dovaja v prostor in pomaga pri ogrevanju, ker je zrak topel, medtem ko v primeru neprezračevanja le te (dodatne) toplote ni oz. se ne more dovajati v prostor.

V tabeli 28 so predstavljeni tudi mesečni rezultati. Z rumeno barvo so označene vrednosti v ogrevalni sezoni (januar, februar, marec, april, oktober, november, december) z modro pa v času hlajenja (maj, junij, julij, avgust, september).

Tabela 28: Mesečne vrednosti potrebne energije za ogrevanje in hlajenje za modela s prezračevanjem in brez prezračevanja v votlini (računska metoda)

Brez prezračevanja v votlini			Naravno prezračevanje v votlini	
	Energija za hlajenje [kWh/m ²]	Energija za ogrevanje [kWh/m ²]	Energija za hlajenje [kWh/m ²]	Energija za ogrevanje [kWh/m ²]
JAN	-0,29	10,54	-0,13	6,85
FEB	-0,81	7,85	-0,32	5,11
MAR	-2,55	3,89	-1,52	2,58
APR	-6,35	1,86	-4,01	1,21
MAJ	-11,07	0,31	-7,56	0,25
JUN	-12,06	0,02	-8,37	0,02
JUL	-16,40	0,00	-13,58	0,00
AVG	-15,57	0,02	-12,41	0,01
SEP	-11,52	0,12	-8,12	0,09
OKT	-9,18	1,53	-5,23	0,95
NOV	-1,08	5,39	-0,75	3,05
DEC	-0,06	10,72	-0,03	6,72
SKUPAJ	-86,95	42,25	-62,02	26,84

Vidno je, da so vrednosti za hlajenje manjše v primeru naravnega prezračevanja v votlini. V ogrevalni sezoni so tudi vrednosti za ogrevanje višje, kljub preprečitvi prezračevanja v votlini. Spodnje tabele prikazujejo mesečne transmisijske in ventilacijske izgube.

Tabela 29: Mesečne vrednosti transmissijskih izgub za model s prezračevanjem v votlini (računska metoda)

	Glazing- [kWh/m ²]	Ceilings (int)- [kWh/m ²]	Floors (int)- [kWh/m ²]	Partitions (int)- [kWh/m ²]	Floors (ext)- [kWh/m ²]	Transmissijske izgube skupaj [kWh/m ²]
JAN	-3,50	-0,04	0,84	-5,67	-0,20	-8,56
FEB	-2,81	0,35	0,27	-4,57	-0,17	-6,93
MAR	-2,26	0,65	-0,17	-3,72	-0,15	-5,64
APR	-1,37	0,23	-0,63	-2,48	-0,10	-4,35
MAJ	-0,67	0,13	-0,30	-1,31	-0,07	-2,22
JUN	-0,10	0,15	-0,58	-0,45	-0,05	-1,02
JUL	0,71	0,33	-0,50	0,70	-0,01	1,23
AVG	0,46	0,54	-0,25	0,40	-0,03	1,12
SEP	-0,56	0,41	-0,14	-1,10	-0,06	-1,45
OKT	-1,47	0,34	0,13	-2,47	-0,10	-3,57
NOV	-2,75	0,40	0,96	-4,39	-0,15	-5,93
DEC	-3,55	0,02	1,31	-5,71	-0,18	-8,11
						45,45

Tabela 30: Mesečne vrednosti ventilacijskih izgub za model s prezračevanjem v votlini (računska metoda)

	Internal Natural vent.- [kWh/m ²]	External Infiltration- [kWh/m ²]	Ventilacijske izgube skupaj [kWh/m ²]	Mech Vent + Nat Vent + Infiltration [ac/h]
JAN	-8,33	-1,00	-9,34	0,064
FEB	-6,98	-0,93	-7,91	0,067
MAR	-5,57	-0,67	-6,24	0,053
APR	-3,89	-0,38	-4,27	0,038
MAJ	-2,46	-0,23	-2,69	0,029
JUN	-1,82	-0,17	-1,99	0,024
JUL	-1,12	-0,10	-1,22	0,016
AVG	-1,49	-0,15	-1,64	0,021
SEP	-2,15	-0,20	-2,35	0,029
OKT	-3,77	-0,43	-4,21	0,043
NOV	-5,93	-0,65	-6,58	0,054
DEC	-8,09	-0,89	-8,98	0,062
			-57,44	

Tabela 31: Mesečne vrednosti transmisijjskih izgub za model brez prezračevanja v votlini (računska metoda)

	Glazing [kWh/m ²]	Ceilings (int)- [kWh/m ²]	Floors (int)[kWh/m ²]	Partitions (int)- [kWh/m ²]	Floors (ext)- [kWh/m ²]	Transmisijjske izgube skupaj [kWh/m²]
JAN	-3,05	-0,29	0,62	-4,92	-0,20	-7,82
FEB	-2,45	0,15	0,13	-3,97	-0,17	-6,31
MAR	-1,95	0,43	-0,20	-3,20	-0,15	-5,07
APR	-1,10	0,11	-0,77	-2,07	-0,11	-3,94
MAJ	-0,42	0,09	-0,55	-0,98	-0,07	-1,93
JUN	0,09	0,15	-0,86	-0,23	-0,05	-0,90
JUL	1,03	0,32	-0,88	1,09	-0,01	1,55
AVG	0,77	0,49	-0,80	0,69	-0,03	1,12
SEP	-0,35	0,31	-0,44	-0,88	-0,06	-1,42
OKT	-1,16	0,25	-0,06	-2,01	-0,11	-3,09
NOV	-2,39	0,08	0,94	-3,76	-0,15	-5,28
DEC	-3,08	-0,25	1,07	-4,94	-0,18	-7,39
						-40,49

Tabela 32: Mesečne vrednosti ventilacijskih izgub za model brez prezračevanja v votlini (računska metoda)

	Internal Natural vent.- [kWh/m ²]	External Infiltration [kWh/m ²]	Ventilacijske izgube skupaj [kWh/m²]	Mech Vent + Nat Vent + Infiltration [ac/h]
JAN	-12,73	-0,85	-13,58	0,055
FEB	-9,97	-0,80	-10,77	0,058
MAR	-6,59	-0,58	-7,17	0,045
APR	-2,80	-0,32	-3,12	0,032
MAJ	0,34	-0,21	0,13	0,024
JUN	1,57	-0,15	1,42	0,020
JUL	1,57	-0,10	1,48	0,015
AVG	1,85	-0,14	1,71	0,019
SEP	1,17	-0,17	1,00	0,023
OKT	-1,21	-0,35	-1,56	0,034
NOV	-8,78	-0,55	-9,34	0,046
DEC	-12,91	-0,76	-13,67	0,054
				-53,39

Pri modelu, kjer je prisotno prezračevanje v votlini, so tako transmisijjske kot ventilacijske izgube večje. Transmisijjske za 5 kWh/(m²a) letno, ventilacijske pa za 4 kWh/(m²a) letno, kar je tudi smiselno. Za vrednost notranjih dobitkov velja ista ugotovitev kot pri prejšnjem primeru s konstantno metodo prezračevanja 3ac/h, saj so tudi vhodni podatki enaki.

V primerjavi z modelom, kjer je šlo za izračun s predpostavljenim konstantnim prezračevanjem z 3 ac/h, je tu program slednjega določil sam. Če torej primerjamo med seboj modela, je vrednost pri hlajenju manjša za 14 kWh/(m²a) letno v modelu s predpostavljenim prezračevanjem 3 ac/h. Vrednost je smiselna saj je zračni pretok večji kot pri računski metodi. Pri ogrevanju pa je vrednost večja (za 18 kWh/(m²a) letno) pri modelu z večjo stopnjo izmenjav zraka-3 ac/h, kar je presenetljivo.

Če pa primerjamo med seboj modela, kjer je bilo prezračevanje v votlini onemogočeno, prostor se je pa prezračeval enkrat po metodi s konstantno privzeto vrednostjo 3 ac/h, drugič pa po računski metodi, sta bili vrednosti za ogrevanje praktično isti. Pri energiji za hlajenje pa je bila seveda vrednost pri računski metodi zaradi manjše količine izmenjav zraka bistveno večja (za kar 37,6 kWh/(m²a) letno).

Rekel bi, da je model z računsko metodo bistveno bolj podoben našemu stanju, saj je hitrost gibanja zraka v sami votlini zelo majhna in pogojena z vzgonom in tlakom vetra in je zato vrednost bolj realna. So pa vrednosti pri energiji za ogrevanje nepričakovane.

- **Poletni režim**

Želeli smo določiti še razliko v temperaturi zraka v prostoru in votlini v primeru zaprte oz. odpre votline za prezračevanje v poletnih mesecih. Ponovno smo uporabili računsko analizo z naravnim prezračevanjem, ker je dala po mojem mnenju bolj realne vrednosti dejanskega stanja. Prišli smo do sledečih ugotovitev:

- Prezračevanje v votlini , brez hlajenja prostorov:

Najnižja temperatura v prostoru je znašala 19°C 2.6 ob 6h zjutraj, najvišja pa 40,6°C 31.7 ob 19h. Najnižja temperatura v votlini je znašala 14,7°C 1.6 ob 1h zjutraj, najvišja pa 52,8°C 3.8 ob 15h.

- Brez prezračevanja v votlini, brez hlajenja prostorov

Najnižja temperatura v prostoru je znašala 19°C 2.6 ob 6h zjutraj, najvišja pa 49,6°C 31.7 ob 16h. Najnižja temperatura v votlini je znašala 14,7°C 1.6 ob 1h zjutraj, najvišja pa 55,2°C 3.8 ob 15h.

Na podlagi zgornjih rezultatov analize poletnega režima ugotovimo, da je največja temperatura razlika v prostoru 9°C, če ni prisotno prezračevanje (brez hlajenja). V votlini je ta razlika samo 2,4 °C. Pričakovali bi večje razlike v temperaturi v votlini, temperatura razlika v prostoru pa je pričakovana.

- **Zimski režim**

Podobno analizo smo izvedli še za zimski režim. Spet je šlo za računsko analizo z naravnim prezračevanjem.

- Prezračevanje v votlini , brez gretja prostorov:

Najnižja temperatura v prostoru je znašala $0,4^{\circ}\text{C}$ 2.12 ob 7h zjutraj, najvišja pa 24°C 28.2 ob 17h.

Najnižja temperatura v votlini je znašala $-4,8^{\circ}\text{C}$ 3.12 ob 7h zjutraj, najvišja pa $32,6^{\circ}\text{C}$ 23.2 ob 15h.

- Brez prezračevanja v votlini , brez gretja prostorov:

Najnižja temperatura v prostoru je znašala $0,4^{\circ}\text{C}$ 2.12 ob 7h zjutraj, najvišja pa 24°C 31.1 ob 16h.

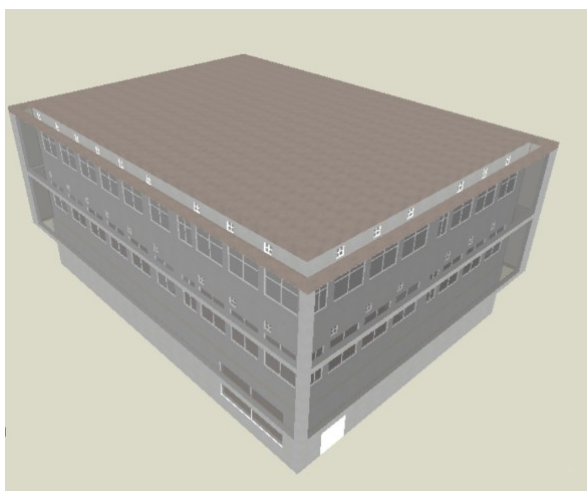
Najnižja temperatura v votlini je znašala $-4,9^{\circ}\text{C}$ 3.12 ob 7h zjutraj, najvišja pa $32,5^{\circ}\text{C}$ 23.2 ob 15h.

Na podlagi zgornjih rezultatov analize zimskega režima ugotovimo, da ni razlike v temperaturi tako v prostoru, kot v votlini, ob prisotnosti prezračevanja ali brez v kolikor prostor ni ogrevan. To so rezultati, ki jih nismo pričakovali in na podlagi katerih morda lahko zaključimo, da program v zimskih mesecih ne upošteva dovolj predgrevanja zraka v votlini.

V modelih, ki sledijo je vedno predpostavljeno prezračevanje tako v prostoru, kot v votlini. Razlika je le v geometriji modelov in v tem, da gre enkrat za izračun s konstantnim prezračevanjem s 3ac/h , enkrat pa za računsko metodo prezračevanja.

8.3.2 Model z odprto dvojno fasado

a) Odprta dvojna fasada



Slika 39: Model z odprto dvojno fasado

V tabeli 33 je prikazan izračun dobitkov in izgub za model z odprto dvojno fasado. Pri modelu s konstantnim prezračevanjem 3ac/h (v nadaljevanju prvi model) je vrednost energije za ogrevanje $43,6\text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, za hlajenje pa $51,8\text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ letno. Pri modelu, kjer je bilo prezračevanje računano z

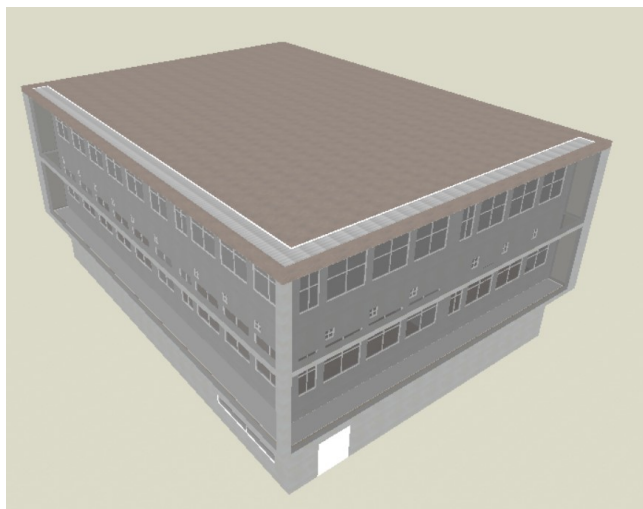
računsko metodo (v nadaljevanju drugi model) pa je vrednost za ogrevanje bistveno večja, in sicer 88,3 kWh/(m²a), za hlajenje pa manjša, in sicer 46,2 kWh/(m²a) letno. Tako velika razlika v ogrevanju je zaradi velikih prezračevalnih izgub. Drugi model ima namreč kar 140 kWh/(m²a) prezračevalnih izgub letno. To je za kar 62 kWh/(m²a) letno več od prvega. Prvi model ima pa za 14 kWh/(m²a) večje transmisijske izgube. V primerjavi z do sedaj omenjenimi modeli imata oba modela za 1,5 kWh/(m²a) več solarnih dobitkov. Vrednost je majhna, a je procentualno kar velika glede na ostale modele. Razlog je najbrž v tem, da je votlina spodaj in zgoraj odprta kar omogoča več dotoka sočnega sevanja.

Tabela 33: Izračun letnih dobitkov in izgub za primer odprte dvojne fasade s konstantnim prezračevanjem 3ac/h (levo) in z računsko metodo prezračevanja (desno)

	Cona (kWh)	(kWh/m ²)		Cona (kWh)	(kWh/m ²)
Energija za ogrevanje	2413	43,56	Energija za ogrevanje	4889	88,25
Energija za hlajenje	2872	51,84	Energija za hlajenje	2561	46,23
Glazing	-709	-12,80	Glazing	-1582	-27,58
Ceilings (int)	-420	-7,58	Ceilings (int)	390	7,04
Floor (int)	-451	-8,14	Floor (int)	1317	23,77
Floor (ext)	-63	-1,14	Floor (ext)	-60	-1,08
Partitions	-1440	-25,99	Partitions	-2430	-43,86
Transmisijske izgube skupaj	-3083	-55,65	Transmisijske izgube skupaj	-2311	-41,71
External infiltration	-4183	-75,51	Internal natural ventilation	-7374	-133,10
External ventilation	-152	-2,74	External air	-403	-7,27
Prezračevalne izgube	-4335	-78,25	Prezračevalne izgube	-7777	-140,38
Solarni dobitki	584	10,54	Solarni dobitki	584	10,54
Razsvetljava	3471	62,65	Razsvetljava	3471	62,65
Oprema	2388	43,10	Oprema	2388	43,10
Uporabniki	1042	18,81	Uporabniki	1042	18,81
Notranji dobitki skupaj	6901	124,57	Notranji dobitki skupaj	6901	124,57
Primarna energija	389006	551	Primarna energija	353706	501

b) Odprta dvojna fasada z rešetkami za zajem in izpust zraka

Ker smo se želeli čim bolj približati dejanskemu stanju objekta smo v programu izdelali še model z rešetkami za zajem in izpust zraka.



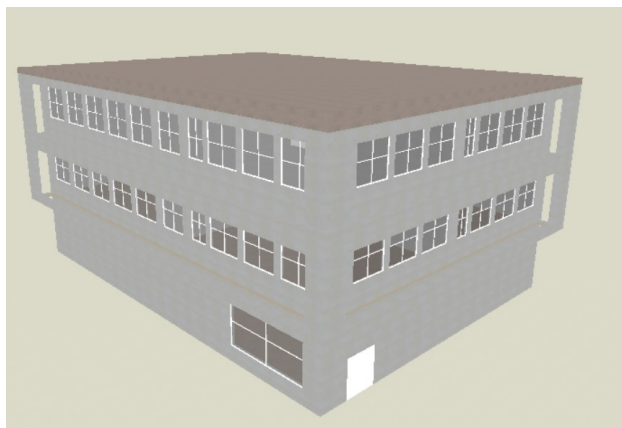
Slika 40: Model z odprto dvojno fasado (z rešetkami za zajem in izpust zraka)

V tabeli 34 je prikazan izračun dobitkov in izgub za model z odprto dvojno fasado z rešetkami za zajem in izpust zraka. Pri modelu s konstantnim prezračevanjem 3ac/h (v nadaljevanju prvi model) je vrednost energije za ogrevanje 44,5 kWh/(m²a), za hlajenje pa 48,3 kWh/(m²a) letno. Pri modelu, kjer je bilo prezračevanje računano z računsko metodo (v nadaljevanju drugi model) pa je vrednost tako za ogrevanje kot hlajenje večja, in sicer 51 kWh/(m²a) pri ogrevanju in 53,2 kWh/(m²a) letno pri hlajenju. Ponovno so nekoliko večje prezračevalne izgube pri drugem modelu (91,4 kWh/(m²a) v primerjavi z 77,2 kWh/(m²a) letno), transmisijske pa so spet višje pri prvem (57,9 kWh/(m²a) v primerjavi z 44,1 kWh/(m²a) letno). Solarni dobitki so nekoliko manjši v primerjavi z modelom A-model z odprto dvojno fasado (brez rešetak) zaradi rešetak (9,2 kWh/(m²a) v primerjavi z 10,5 kWh/(m²a)). Primerjava obeh modelov (z rešetkami in brez) pa pokaže, da pri izračunu rabe energije z metodo konstantnega prezračevanja s 3 ac/h bistvenih razlik v vrednostih ni. Te se pojavijo pri modelih z računsko metodo prezračevanja. Predvsem izstopa vrednost energije za ogrevanje, ki je pri modelu brez rešetak za kar 37 kWh/(m²a) večja na letnem nivoju.

Tabela 34: Izračun letnih dobitkov in izgub za primer odprte dvojne fasade z rešetkami s konstantnim prezračevanjem 3ac/h (levo) in računsko metodo prezračevanja (desno)

	Cona (kWh)	(kWh/m ²)		Cona (kWh)	(kWh/m ²)
Energija za ogrevanje	2468	44,55	Energija za ogrevanje	2825	50,99
Energija za hlajenje	2678	48,34	Energija za hlajenje	2948	53,21
Glazing	-737	-13,30	Glazing	-1320	-23,83
Ceilings (int)	-700	-12,64	Ceilings (int)	397	7,17
Floor (int)	-250	-4,51	Floor (int)	674	12,17
Floor (ext)	-62	-1,12	Floor (ext)	-64	-1,16
Partitions	-1456	-26,28	Partitions	-2130	-38,45
Transmisijske izgube skupaj	-3205	-57,85	Transmisijske izgube skupaj	-2443	-44,10
External infiltration	-4143	-74,78	Internal natural ventilation	-4568	-82,45
External ventilation	-137	-2,47	External air	-493	-8,90
Prezračevalne izgube	-4280	-77,26	Prezračevalne izgube	-5061	-91,35
Solarni dobitki	508	9,17	Solarni dobitki	508	9,17
Razsvetljava	3471	62,65	Razsvetljava	3471	62,65
Oprema	2388	43,10	Oprema	2388	43,10
Uporabniki	1042	18,81	Uporabniki	1042	18,81
Notranji dobitki skupaj	6901	124,57	Notranji dobitki skupaj	6901	124,57
Primarna energija	389006	551	Primarna energija	335350	475

8.3.3 Model s klasično enojno fasado



Slika 41: Model z enojno fasado

V primeru modela, kjer imamo samo notranji fasadni ovoj, so rezultati precej drugačni (tabela 35). Pri modelu s konstantnim prezračevanjem 3ac/h (v nadaljevanju prvi model) je vrednost energije za ogrevanje 20,7 kWh/(m²a), za hlajenje pa kar 94,6 kWh/(m²a) letno (zaradi samo ene zasteklitve in večje transmisije zasteklitve, je letna potreba po hlajenju prostora večja, posledično pa je več solarnih dobitkov in potreba po ogrevanju bistveno manjša). Pri modelu, kjer je bilo prezračevanje računano z računsko metodo (v nadaljevanju drugi model) pa je vrednost energije za ogrevanje bistveno večja, in sicer 77,8 kWh/(m²a) (zaradi zelo velikih prezračevalnih izgub), za hlajenje pa 65,05 kWh/(m²a). Razlog za tako veliko razliko v energiji za ogrevanje gre spet iskati v bistveno večjih prezračevalnih izgubah drugega modela (kar 158,3 kWh/(m²a) v primerjavi z 95,5 kWh/(m²a) prvega modela). Transmisijske so višje pri drugem modelu (23,8 kWh/(m²a)), pri prvem modelu so zanemarljive, kar je presenetljivo. Solarni dobitki so seveda največji v primerjavi z vsemi modeli (kar 27,3 kWh/(m²a)).

Tabela 35: Izračun dobitkov in izgub za primer modela z enojno fasado s konstantnim prezračevanjem 3ac/h (levo) in računsko metodo prezračevanja (desno)

	Cona (kWh)	(kWh/m ²)
Energija za ogrevanje	1149	20,74
Energija za hlajenje	5239	94,57
Glazing	1725	31,14
Ceilings (int)	25,7	0,46
Floor (int)	-3780	-68,23
Floor (ext)	-84	-1,52
Partitions	2034	36,71
Transmisijske izgube skupaj	-79,3	-1,43
External infiltration	-4836	-87,29
External ventilation	-456	-8,23
Prezračevalne izgube	-5292	-95,52
Solarni dobitki	1511	27,27
Razsvetljava	3471	62,65
Oprema	2388	43,10
Uporabniki	1042	18,81
Notranji dobitki skupaj	6901	124,57
Primarna energija	335350	475

	Cona (kWh)	(kWh/m ²)
Energija za ogrevanje	4311	77,82
Energija za hlajenje	3604	65,05
Glazing	-894	-16,14
Ceilings (int)	778	14,04
Floor (int)	115	2,08
Floor (ext)	-68	-1,23
Partitions	-1253	-22,62
Transmisijske izgube skupaj	-1322	-23,86
Internal natural ventilation	-8405	-151,71
External ventilation	-364	-6,57
Prezračevalne izgube	-8769	-158,29
Solarni dobitki	1511	27,27
Razsvetljava	3471	62,65
Oprema	2388	43,10
Uporabniki	1042	18,81
Notranji dobitki skupaj	6901	124,57
Primarna energija	352294	499

8.4 Analiza toplotnega okolja

Toplotno okolje ocenjujemo s pomočjo Fangerjevega indeksa pričakovane presoje toplotnega občutja PMV (predicted mean vote). Indeks podaja pričakovano povprečno oceno toplotnega okolja večjega števila ljudi s pomočjo 7-stopenjske lestvice [29].

mrzlo	hladno	prijetno hladno	nevtrarno	prijetno toplo	toplo	vroče
-3	-2	-1	0	+1	+2	+3

Slika 42: 7-stopenjska lestvica Fangerjevega modela toplotnega okolja

Pri izračunu se upošteva:

- Aktivnost [met]
- Oblečenost [clo]
- Temperaturo zraka [°C]
- Sevalno temperaturo [°C]
- Hitrost zraka [m/s]
- Vlažnost zraka [Pa] [29]

Če pogledamo v Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Ur. l. RS, št. 42/02, 105/02, 110/02 – ZGO-1 in 61/17 – GZ) ta v drugem poglavju z naslovom Toplotno okolje, v 11. členu navaja, da mora biti toplotno okolje tako, da je indeks PMV v mejah $-0,7 < PMV < 0,7$. V prilogi 1 tega pravilnika, pa je pod naslovom Parametri načrtovanja opisano, da mora biti v posamičnih pisarnah oz. pisarnah za več ljudi občutena temperatura poleti $24,5^{\circ}\text{C} \pm 2,5^{\circ}\text{C}$, pozimi pa $22^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$.

Sledijo predstavljene rednosti PMV za naslednje 4 modele:

Tabela 36: Zaprta dvojna fasada, konstantno prezračevanje s 3 ac/h v votlini in prostorih

Air Temperature (°C)	17,64	17,74	18,95	21,35	22,82	23,84	25,11	24,96	23,05	21,28	18,62	17,57
Radiant Temperature (°C)	16,32	16,72	18,48	21,28	23,35	24,64	26,51	26,33	23,70	21,44	17,83	16,17
Operative Temperature (°C)	16,98	17,23	18,71	21,31	23,08	24,24	25,81	25,64	23,37	21,36	18,23	16,87
Outside Dry-Bulb Temperature (°C)	-1,20	-0,85	3,85	9,45	14,00	16,61	20,36	18,90	14,86	9,65	4,00	-0,03
Relative Humidity (%)	26,26	27,90	28,99	35,85	42,45	46,64	48,65	46,46	48,45	41,39	37,56	32,73
Discomfort hrs (all clothing) (hrs)	174,50	122,50	77,00	28,00	0,00	0,00	7,00	11,50	0,50	20,00	89,50	164,50
Fanger PMV ()	-1,63	-1,56	-1,20	-1,67	-1,07	-0,63	-0,07	-0,14	-0,92	-0,47	-1,27	-1,62

Tabela 37: Zaprta dvojna fasada, brez konstantnega prezračevanja s 3 ac/h v votlini

Air Temperature (°C)	17,64	17,76	18,96	21,37	22,84	23,87	25,13	24,99	23,08	21,32	18,63	17,57
Radiant Temperature (°C)	16,32	16,75	18,50	21,32	23,41	24,70	26,58	26,40	23,76	21,52	17,85	16,18
Operative Temperature (°C)	16,98	17,25	18,73	21,35	23,12	24,29	25,86	25,70	23,42	21,42	18,24	16,87
Outside Dry-Bulb Temperature (°C)	-1,20	-0,85	3,85	9,45	14,00	16,61	20,36	18,90	14,86	9,65	4,00	-0,03
Relative Humidity (%)	26,26	27,88	28,96	35,72	42,40	46,56	48,58	46,32	48,36	41,25	37,53	32,72
Discomfort hrs (all clothing) (hrs)	174,50	122,50	76,50	27,50	0,00	0,00	7,00	14,00	0,50	19,00	89,00	164,50
Fanger PMV ()	-1,63	-1,56	-1,19	-1,66	-1,06	-0,62	-0,05	-0,12	-0,91	-0,46	-1,27	-1,62

V zgornjih dveh tabelah so prikazani rezultati elementov ugodja (comfort) po mesecih, kot jih podaja program DesignBuilder. V obeh tabelah gre za konstanto prezračevanje s 3 ac/h, le da ima tabela 36 prezračevanje tudi v votlini, tabela 37 pa ne. Rezultati so nekoliko presenetljivi, saj bi pričakovali višje vrednosti v poletnih mesecih. Če ju primerjamo vidimo, da praktično ni razlik. Po pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji v stavbah toplotno okolje zadostuje kriteriju v mesecih junij, julij in avgust. Tako nizkim vrednostim botruje hlajenje, ki vzdržuje relativno nizke temperature, a povečuje rabo energije za hlajenje. Ko smo analizirali primer istega modela brez prisotnosti hlajenja v istih mesecih, so bile vrednosti zelo visoke, okrog 3. Relativna vlaga se giba od 26% pozimi, do 49% poleti.

V spodnjih dveh tabelah so ponovno prikazani rezultati elementov ugodja (comfort) po mesecih. Tokrat gre v obeh tabelah za prezračevanje z računsko metodo, le da ima tabela 38 prezračevanje tudi v votlini, tabela 39 pa ne. Rezultati imajo ponovno precej nizke vrednosti v poletnih mesecih. Ponovno ugotovimo da med njima ni bistvenih razlik. Po pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji v stavbah toplotno okolje zadostuje kriteriju v mesecih junij, julij, avgust, september in oktober, kar je več kot v primerih s konstantnim prezračevanjem s 3ac/h. Relativna vlaga se giba od 35% pozimi, do 46% poleti in je bolj enakomerna kot pri metodi s konstantnim prezračevanjem s 3 ac/h.

Tabela 38: Zaprta dvojna fasada, prezračevanje z računsko metodo v votlini in prostorih

Air Temperature (°C)	18,57	18,99	20,59	22,51	23,67	24,60	25,59	25,47	23,91	22,35	20,04	18,48
Radiant Temperature (°C)	17,69	18,33	20,34	22,59	24,21	25,34	26,86	26,68	24,54	22,60	19,56	17,58
Operative Temperature (°C)	18,13	18,66	20,47	22,55	23,94	24,97	26,23	26,08	24,22	22,47	19,80	18,03
Outside Dry-Bulb Temperature (°C)	-1,20	-0,85	3,85	9,45	14,00	16,61	20,36	18,90	14,86	9,65	4,00	-0,03
Relative Humidity (%)	35,94	35,32	35,37	39,99	43,99	45,89	45,48	44,70	47,23	44,58	44,94	41,82
Discomfort hrs (all clothing) (hrs)	100,50	72,00	26,00	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	33,50	97,00
Fanger PMV ()	-1,30	-1,17	-0,73	-1,23	-0,76	-0,38	0,06	0,00	-0,63	-0,17	-0,83	-1,29

Tabela 39: Zaprta dvojna fasada, brez prezračevanja z računsko metodo v votlini

Air Temperature (°C)	18,61	19,02	20,55	22,53	23,76	24,76	25,76	25,77	24,08	22,39	19,98	18,54
Radiant Temperature (°C)	17,89	18,50	20,41	22,71	24,38	25,53	27,11	27,01	24,73	22,74	19,64	17,79
Operative Temperature (°C)	18,25	18,76	20,48	22,62	24,07	25,15	26,43	26,39	24,40	22,57	19,81	18,17
Outside Dry-Bulb Temperature (°C)	-1,20	-0,85	3,85	9,45	14,00	16,61	20,36	18,90	14,86	9,65	4,00	-0,03
Relative Humidity (%)	35,08	35,31	36,39	41,89	44,91	45,82	44,71	44,09	46,85	46,01	44,89	40,61
Discomfort hrs (all clothing) (hrs)	94,00	67,00	25,00	8,00	9,00	8,50	9,50	30,00	14,50	3,50	32,00	90,00
Fanger PMV ()	-1,28	-1,15	-0,72	-1,19	-0,71	-0,32	0,13	0,11	-0,57	-0,13	-0,83	-1,27

Pri modelih z odprto dvojno fasado so bile vrednosti PMV indeksa zelo podobne vrednostim za primer zaprte dvojne fasade, zato jih nisem dodal v nalogo. Poglejmo si še najvišje vrednosti, ki se pojavijo pri modelu z enojnim fasadnim ovojem. Zaradi večjih solarnih dobitkov so vrednosti v poletnih mesecih

višje (1,14 pri konstantnem prezračevanju 3 ac/h-tabela 40). Tabela 41, ki pa predstavlja računski model prezračevanja ima ponovno nižje vrednosti poleti. So pa zato višje zimske vrednosti (-1,67 januarja).

Tabela 40: Enojna fasada, konstantno prezračevanje 3 ac/h

Air Temperature (°C)	18,67	19,45	21,35	23,85	25,21	26,58	27,59	27,56	25,24	23,32	20,06	18,40
Radiant Temperature (°C)	18,50	19,82	22,41	25,66	27,65	29,29	31,15	30,98	27,55	25,13	20,23	18,05
Operative Temperature (°C)	18,58	19,64	21,88	24,76	26,43	27,94	29,37	29,27	26,40	24,22	20,14	18,22
Outside Dry-Bulb Temperature (°C)	-1,20	-0,85	3,85	9,45	14,00	16,61	20,36	18,90	14,86	9,65	4,00	-0,03
Relative Humidity (%)	24,79	25,45	25,18	30,81	36,75	39,60	42,26	40,16	42,42	36,26	34,45	31,01
Discomfort hrs (all clothing) (hrs)	89,00	54,00	10,50	16,00	33,00	60,50	158,50	132,00	42,00	30,50	27,50	88,00
Fanger PMV ()	-1,26	-1,00	-0,45	-0,54	0,04	0,61	1,14	1,09	0,08	0,21	-0,82	-1,31

Tabela 41: Enojna fasada, računski model prezračevanja

Air Temperature (°C)	17,15	17,28	18,90	21,71	23,37	24,65	25,87	25,57	23,61	21,46	18,46	17,18
Radiant Temperature (°C)	16,60	17,27	19,57	22,81	24,94	26,41	28,21	27,87	25,08	22,61	18,52	16,48
Operative Temperature (°C)	16,87	17,28	19,24	22,26	24,16	25,53	27,04	26,72	24,34	22,04	18,49	16,83
Outside Dry-Bulb Temperature (°C)	-1,20	-0,85	3,85	9,45	14,00	16,61	20,36	18,90	14,86	9,65	4,00	-0,03
Relative Humidity (%)	25,69	27,50	28,07	34,67	41,81	44,53	45,92	44,44	46,74	40,82	36,91	32,24
Discomfort hrs (all clothing) (hrs)	175,50	110,50	53,50	12,50	5,00	5,00	44,50	62,00	6,50	7,50	74,50	167,00
Fanger PMV ()	-1,67	-1,57	-1,09	-1,37	-0,71	-0,21	0,34	0,22	-0,61	-0,32	-1,22	-1,65

Glede na to, da smo pri izračun rabe energije za ogrevanje dobili nepričakovane rezultate, smo se pri analizi toplotnega udobja osredotočili na poletni režim (junij, julij, avgust). Rezultati kažejo, da so bolj udobne razmere dosežene v primerih modelov z dvojno fasado (tako zaprta kot odprta). V modelih z enojnim fasadnim ovojem nismo dosegli udobja v poletnih mesecih zaradi previsokih vrednosti občutene temperature. V juliju so namreč vrednosti višje od 27 °C. PMV vrednosti so bile presežene samo pri modelu z enojno fasado in konstantnim prezračevanjem 3 ac/h v mesecu juliju (1,14).

8.5 Primerjava modelov med seboj in z zakonodajo

8.5.1 Primerjava med modeli

Če med seboj primerjamo vse modele, kjer je bil izračun rabe energije izveden s privzetim konstantnim prezračevanjem 3 ac/h ugotovimo, da ni bistvenih razlik v letnih vrednostih rabe energije za ogrevanje in hlajenje med modeli z zaprto fasado (hlajenje 48,5 kWh/(m²a), ogrevanje 44,3 kWh/(m²a)), odpro fasado (hlajenje 51,8 kWh/(m²a), ogrevanje 43,6 kWh/(m²a)) in odprto fasado z rešetkami (hlajenje 48,3 kWh/(m²a) in ogrevanje 44,6 kWh/(m²a)). Razlika se pojavi samo pri zadnjem modelu s klasično enojno fasado. To je smiselno, saj ima zaradi enojnega fasadnega sistema bistveno več solarnih dobitkov in s tem večjo potrebo po hlajenju (94,6 kWh/(m²a)). Potreba po ogrevanju je pa ravno zaradi solarnih dobitkov manjša (20,7 kWh/(m²a)). Vendar bi kljub vsemu rekel, da te vrednosti preveč odstopajo v eno oz. drugo stran. Najmanj energije za hlajenje porabi torej model z odprto fasado z rešetkami 48,3 kWh/(m²a), za ogrevanje pa model z odprto fasado 43,6 kWh/(m²a).

Če med seboj primerjamo vse modele, kjer je bil izračun rabe energije izveden z računskim modelom prezračevanja pa vidimo, da prihaja do odstopanj letnih vrednostih rabe energije za ogrevanje in hlajenje

med modeli z zaprto fasado (hlajenje $62 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, ogrevanje $26,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$), odpro fasado (hlajenje $46,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, ogrevanje $88,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$) in odprto fasado z rešetkami (hlajenje $53 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ in ogrevanje $51 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$). Model z enojno fasado ima pa vrednosti $77,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ za ogrevanje in $65,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ za hlajenje. Najmanj energije za hlajenje porabi torej model z odprto fasado $46,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, za ogrevanje pa model z zaprto fasado s prezračevanjem v votlini, in sicer $26,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, kar je bilo nepričakovano.

Spomnimo, da je bilo pri vseh modelih prezračevanje prisotno tako v votlini kot v prostorih.

Najmanjša skupna primarna energija se pojavi pri modelu z zaprto fasado in računsko metodo prezračevanja (prezračevanje tako v votlini, kot v prostorih), in sicer $456 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$.

Na podlagi zgornjih ugotovitev sem mnenja, da je bolj kot sama geometrija programskemu orodju DesignBuilder, pomembna nastavitev vhodnih podatkov. V našem primeru je na rezultate vplivala predvsem nastavitev prezračevanja. Do odstopanj je prihajalo pri izračunih z računsko metodo prezračevanja.

8.5.2 Toplotne prehodnosti

Izračun gradbene fizike konstrukcijskih sklopov obravnavanega objekta je pokazal, da vrednosti toplotnih prehodnosti zunanje stene in strehe presegajo vrednosti iz tehnične smernice TSG-1-004:2010. Toplotne prehodnosti so namreč:

- Zunanja stena oz. stena proti neogrevanemu prostoru: $0,623 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) > 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- Streha oz. strop proti neogrevanem prostoru: $0,286 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) > 0,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Toplotna prehodnost tal na terenu je znotraj dovoljenih vrednosti:

- Tla proti zemljini oz. tla na terenu: $0,219 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) < 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

8.5.3 Osvetljenost

Meritve osvetljenosti so pokazale, da povprečna vrednost KDS-a ($1,54\%$) v prostoru ne ustreza nobenemu standard oz. minimalnim priporočilom. Glede na vrednosti iz standarda SIST EN 12464-1:2011 za območje uradov in pisarn smo ugotovili, da zadostni osvetljenost v lx-ih v jasnem vremenu zadošča 60% prostora. Od izbranih 80 referenčnih točk je bila namreč vrednost višja od 500 lx v 48-ih točkah, v 32 pa je bila ta vrednost nižja. Najvišja vrednost je bila 2720 lx , najnižja pa 120 lx . Ob oknu se torej pojavi tudi bleščanje, saj so vrednosti nad 2000 lx . Glede na to, da gre za južno orientiran prostor, ki ima relativno veliko transparentnih površin, smo pričakovali višje vrednosti. Razlog gre iskati v zelo nizki transmittivnosti umazanih oken (zaradi neobratovanja stavbe), pribitih deskah tik pod stropom in rastjem pred zunanjo fasado. Ostali razlogi so pomanjkljiva zasnova transparentnega dela ovoja. Ob ureditvi zgoraj naštetih pomanjkljivosti bi bile vrednosti najbrž višje.

8.5.4 Hitrost gibanja zraka

Meritve hitrosti zraka v votlini (14.6.2017 okrog 16h, povprečna zunanja temperatura je znašala 21,6 °C) so pokazale, da je v najboljšem primeru (sončno vreme, odprte lopute) največja hitrost gibanja zraka 0,23 m/s na južni fasadi, v drugi etaži. Povprečna hitrost za celotno južno fasado je še nekoliko manjša, in sicer 0,18 m/s. Za hitrost zraka v dvojnih fasadah ni priporočil, vendar če to vrednost primerjamo z objekti dobre prakse, kjer so povprečne hitrosti 2-3 m/s ugotovimo, da so pri nas hitrosti več kot 10-krat manjše. Zaradi tako majhne hitrosti gibanja zraka prihaja do pregrevanja v votlini in v samih prostorih. Najvišja temperatura zraka v votlini je namreč znašala 37,8°C na zahodni fasadi pri odprtih loputah. Vrednosti hitrosti zraka so še nekoliko nižje v primeru oblačnega vremena, kar je smiselno. Gibajo se okrog 0,10 m/s, torej v povprečju skoraj dva krat manj kot v primeru sončnega vremena.

8.5.5 Hrup, temperatura in vlaga

Okoljska mejna raven zunanjega hrupa za 3. območje varstva pred hrupom, kamor spada naš objekt, je po Pravilniku o zvočni zaščiti stavb 60 dB, mejne vrednosti hrupa v notranjih prostorih pa so za stanovanja in učilnice oz. predavalnice 35 dB. Pri nas je bila prva izmerjena vrednost 50 dB, druga pa 30 dB (obe izmerjeni 21.3.2017 ob 14:00), kar je znotraj priporočil.

Povprečna temperatura zraka v prostoru je znašala 14,2°C (datum meritve: 21.3.2017, zunanja temperatura je bila 18,5 °C). Povprečne vrednosti temperatur obodnih površin so bile sledeče: strop-8,1 °C, tla-4,9 °C, S stena-7,7 °C, V stena-10,5 °C.

V prostoru smo izmerili relativno vlažnost zraka, ki znaša 62 %. Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb predvideva dopustne relativne vlažnosti med 30 % in 70 % pri temperaturi prostora med 20 in 26 °C, kar je znotraj priporočil.

Zavedati pa se je tudi potrebno, da je bil prostor v času meritev neogrevan oz. na splošno v neobratovalni fazi.

8.5.6 Energija za ogrevanje, hlajenje, primarna energija

Kot je bilo rečeno že v poglavju 3 Teoretične osnove in zakonodaja mora veljati sledeče:

- Potrebna toplota za ogrevanje $Q(NH)$ stavbe, preračunana na enoto kondicionirane prostornine $V(e)$ za nestanovanjske stavbe, ne presega $Q(NH)/V(e) \leq 0,32 (45 + 60 f(0) - 4,4 T(L))$ kWh/(m³a). Dobimo torej $Q(NH)/V(e) \leq 4,43$ kWh/(m³a). Če primerjamo z našimi modeli so pri vseh vrednosti potrebne toplote za ogrevanje bistveno večje. Še najbolj se dovoljeni vrednosti približa modela z enojno fasado s konstantno metodo prezračevanja s 3ac/h, kjer je ta

vrednost $6,91 \text{ kWh}/(\text{m}^3\text{a})$, pri modelih z dvojno fasado pa model zaprte dvojne fasade z računsko metodo prezračevanja (prezračevanje tako v prostorih, kot v votlini), kjer je bila vrednost $8,95 \text{ kWh}/(\text{m}^3\text{a})$ letno.

- Dovoljen letni potreben hlad za hlajenje $Q(\text{NC})$ stavbe, preračunan na enoto hlajene površine stavbe $A(u)$, ne presega $Q(\text{NC})/A(u) \leq 50 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Te vrednosti nista preseгла oba modela z zaprto dvojno fasado s konstantno metodo prezračevanja s 3 ac/h (tako s prezračevanjem, kot brez prezračevanja v votlini), model z odprto dvojno fasado z računsko metodo prezračevanja tako v prostorih kot v votlini ter model odprte dvojne fasade z rešetkami s konstantnim prezračevanjem 3ac/h tako v prostorih, kot v votlini. Treba pa je dodati, da to vrednost Pures podaja za stanovanjske stavbe, kamor naš objekt ne spada. Za nestanovanjske oz. poslovne stavbe ta vrednost ni predpisana.
- Letna primarna energija za delovanje sistemov v stavbi $Q(p)$, preračunana na enoto ogrevane površine stavbe $A(u)$, ne presega $Q(p)/A(u) = 200 + 1,1 (60 f(0) - 4,4 T(L)) \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Dobimo torej $Q(p)/A(u) = 165,72 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Če vrednost ponovno primerjamo z modeli ugotovimo, da vsi krepko presegajo dovoljeno vrednost. Če pa upoštevamo dejstvo, da je v Akcijskem načrtu za skoraj nič-energijske stavbe za obdobje do leta 2020 (AN sNES) predvidena največja dovoljena vrednost za primarno energijo $65 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ za rekonstrukcijo nestanovanjskih stavb in $55 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ za novogradnje, vidimo, da smo zelo daleč od pričakovane vrednosti.

V enačbah smo upoštevali, da je $f(0)$ oz. faktor oblike, razmerje med površino toplotnega ovoja stavbe in neto ogrevano prostornino stavbe ($f(o) = A/V(e)$), in torej znaša $0,28$ (točno vrednost faktorja oblike je zelo težko določiti, ker ne vemo natančno kateri prostori v objektu so bili ogrevani, zato bi moral biti volumen v izračunu nekoliko manjši od dejanskega volumna stavbe in faktor oblike nekoliko večji; je pa zaradi enostavne oblike stavbe ta faktor tudi v resnici precej majhen), $T(L)$ pa je povprečna letna temperatura zunanjega zraka, ki znaša v Ljubljani $10,9^\circ\text{C}$ [30].

8.6 Ukrepi

Kot že ničlikokrat omenjeno, dvojna fasada objekta SOP Krško ne deluje pravilno. Če bi povzeli vse ugotovitve do katerih smo prišli v tej nalogi, bi za učinkovitejše delovanje dvojne fasade objekta SOP Krško izvedli naslednje ukrepe:

- namestitev ventilatorjev in s tem mehansko prezračevanje dvojne fasade,
- prenova samih loput, razmisliti o mehanskem odpiranju, zapiranju loput,
- zaščitni premaz za kaljeno steklo,
- zaradi neenakomerne porazdelitve temperatur po smereh neba dvojne fasade, bi bilo treba v zimskih mesecih tople segrete zrak iz J in Z fasade odvesti na V in S stran fasade,

- tesnila v špranjah med stiki zunanjega kaljenega stekla dvojne fasade,
- odstranitev oz. premestitev zunanjih enot klimatskih naprav,
- postavitev senčil v sredino ventilacijske cone, dobra izbira so žaluzije saj lahko spreminjamo kote letvic in s tem omogočamo boljši pretok zraka,
- glede na višino objekta manjša širina ventilacijskega kanala, najbolje pa oboje, večja višina fasade in manjša širina same votline v kolikor želimo objekt ohlajati s pomočjo naravnega prezračevanja,
- enojna zasteklitev zunanje fasade z dobro transmitivnostjo, dobro absorptivna dvojna zasteklitev na notranjo fasado,
- zagotavljati je treba čistost predvsem zunanjega ovoja dvojne fasade za doseg dobre transmitivnosti,
- odstranitev ovir in elementov znotraj prezračevalnega kanala,
- večje odprtine za zajem in izpust zraka, saj le-te povzročijo boljši pretok,
- optimalna je južna orientacija dvojne fasade.

Seveda bi boljšo energijsko učinkovitost objekta dosegli tudi z zamenjavo samih oken in fasade z boljšimi izolacijskimi lastnostmi, vendar so to ukrepi, ki niso direktno povezani s samim načinom delovanja dvojne fasade, zato to ni bil predmet moje naloge. Z upoštevanjem zgornjih ukrepov bi zagotovo dosegli energijsko bolj učinkovito ter uporabnikom bolj prijazno okolje.

9 ZAKLJUČKI IN UGOTOVITVE

Izračun gradbene fizike konstrukcijskih sklopov je pokazal, da tako zunanja stena kot streha ne izpolnjujeta predpisanih vrednosti toplotnih prehodnosti po sedanjih predpisih. Je pa treba upoštevati dejstvo, da je bil objekt projektiran pred več kot tridesetimi leti in so bili takratni predpisi seveda drugačni. Tla na terenu so zadostila kriteriju.

Dokazali smo hipotezo o slabi kvaliteti osvetljenosti v prostoru. Z meritvami smo namreč dokazali, da tako KDS, kot sama osvetljenost v lx-ih ne ustrežata priporočilom. Dokazali smo tudi, da je hitrost gibanja zraka v prezračevalni votlini prenizka (maksimalna izmerjena hitrost je znašala 0,23 m/s, morala bi pa biti okrog 2-3 m/s), kar povzroča pregrevanje v njej in samih prostorih. Meritve vlage in hrupa so pokazale dovoljene vrednosti.

Dokazali smo nepravilno zasnovo same fasade (premajhna višina, prevelika širina votline, špranje v zunanjem ovoju, nepravilna postavitev senčil, slaba transmitivnost zunanje zasteklitve) in neprimerno vzdrževanje le-te (poškodovane lopute za zajem in izpust zraka, nepravilna konstrukcija le-teh, nepravilna postavitev klimatskih naprav, umazana okna-zaradi neobratovanja objekta).

Potrdili smo tudi hipotezo, da bo izračun s programskim orodjem DesignBuilder pokazal, da dvojna fasada zniža rabo energije za hlajenje poleti (v kolikor je prisotno prezračevanje v votlini), ovrgli pa tisto, da dvojna fasada prav tako znižuje rabo energije pozimi (v kolikor v votlini ni prezračevanja in se zrak v njej predgreje). Program slednjega namreč ni dokazal, kar je bilo presenetljivo. Kot je bilo že opisano je ena od možnih razlag zakaj do tega pride dejstvo, da se v primeru prezračevanja pretvorjena sončna energija v toploto iz prostora med steklom in steno dovaja v prostor in pomaga pri ogrevanju, ker je zrak topel, medtem ko v primeru neprezračevanja le te (dodatne) toplote ni oz. se ne more dovajati v prostor. V ozadje samega izračuna programskega orodja DesignBuilder nismo hodili, zato natančnega odgovora na to vprašanje ne poznamo, lahko pa predpostavimo da gre za določene omejitve programa.

V večji meri smo potrdili tudi hipotezo glede potrebne letne toplote za ogrevanje $Q(NH)$, letnega hlada za hlajenje $Q(NC)$ in letne primarne energije za delovanje sistemov v stavbi $Q(p)$. Vsi modeli namreč presegajo letno potrebno toploto za ogrevanje (zaradi velikih transmisijskih izgub, ki so posledica slabega fasadnega ovoja), nekaj modelov zadošča letni potrebi po hladu za hlajenje (oba modela z zaprto dvojno fasado-en s konstantnim prezračevanjem s $3ac/h$ v votlini in drugi brez prezračevanja v votlini), model z odprto dvojno fasado z računsko metodo prezračevanja tako v prostorih kot v votlini ter model odprte dvojne fasade z rešetkami s konstantnim prezračevanjem $3ac/h$ tako v prostorih kot v votlini), prav tako pa vsi presegajo vrednosti primarne energije.

Pri analizi toplotnega udobja smo se, kot že rečeno, osredotočili na poletni režim (junij, julij, avgust), saj smo pri izračun rabe energije za ogrevanje dobili nepričakovane rezultate. Rezultati so pokazali, da so bolj udobne razmere dosežene v primerih modelov z dvojno fasado (tako zaprta kot odprta), v primerjavi z enojnim fasadnim ovojem. V modelih z enojnim ovojem namreč nismo dosegli udobja v poletnih mesecih zaradi previsokih vrednosti občutene temperature. Pri dvojnih fasadah pa so bile tako vrednosti PMV kot občutene temperature znotraj dovoljenih. Kljub vsemu pa moramo dodati, da so bile vrednosti PMV nekoliko nizke in nepričakovane in so v določenih primerih precej odstopale od povprečja.

In kar je na koncu najbolj pomembno, vprašanje ali je programsko orodje DesignBuilder smiselno za analizo objektov z dvojno fasado. Dejstvo je, da orodje nima zmožnosti izračunavanja energijske učinkovitosti med dinamičnimi spremembami v votlini, ko simulacije tečejo. Z drugimi besedami, čas ne more biti spremenljivka za simulacije. Posledično je treba vse nastavitve in spremembe v votlini prilagoditi ročno. Tako pridemo do ločenih rezultatov simulacij in proces zbiranja in analize podatkov je zelo dolgotrajen. Zato je priporočljivo, da se ta programska oprema ne uporablja za dinamično analizo učinkovitosti dvojnih fasad. Prav tako program ne podaja dejanskih hitrosti gibanja zraka znotraj votline tako kot nekateri programi za dinamiko fluidov, npr. Ansys.

Moramo pa dodati, da program računa povečanje temperature v regi med steklom in steno in daje v poletnem scenariju smiselne vrednosti, česar npr. program URSA ne omogoča. Še najbolj se je dejanskemu stanju približala računska metoda določanja prezračevanja, vendar nam je ta dala nepričakovane vrednosti v primeru ogrevanja v zimskem scenariju.

Ker dejanski objekt že nekaj let ne obratuje, nismo uspeli dobiti konkretnih podatkov o njegovi rabi energije in zato vrednosti ne moremo primerjati z vrednostmi iz analize. Lahko pa na podlagi informacij, ki smo jih o objektu dobili, zagotovo trdimo, da je prišlo v njem do pregrevanja poleti in velike izgube toplote pozimi, ter v povezavi s tem do ogromne rabe energije tako za hlajenje kot za ogrevanje.

VIRI

- [1] Šijanec Zavrl, M. 2012. Kakšne so skoraj nič energijske hiše stavbe. EGES.
<http://www.e-m.si/media/eges/casopis/2012/1/41.pdf>. (Pridobljeno 10. 3. 2018)
- [2] Energetska učinkovitost in energetske izkaznice. 2018.
<http://www.energetska-ucinkovitost.si/energetska-ucinkovitost-v-stavbah/evropske-direktive/epbd-20022010/> (Pridobljeno 11. 3. 2018)
- [3] Predlog o spremembah direktive EPBD 2010/31/EU.
https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/1_en_act_part1_v10.pdf (Pridobljeno 15. 3. 2018)
- [4] Energetska izkaznica stavbe. 2018.
<http://www.energetska-izkaznica.si/energetska-izkaznica/kaj-je/energetski-razredi/> (Pridobljeno 5. 2. 2018)
- [5] Akcijski načrt za skoraj nič-energijske stavbe za obdobje do leta 2020 (AN sNES).
http://www.energetika-portal.si/fileadmin/dokumenti/publikacije/an_snes/ansnes_final_apr_2015.pdf
(Pridobljeno 10. 1. 2018)
- [6] Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah, Ur. l. RS, št 52/2010: 7840.
- [7] Gradbeni zakon, Ur. l. RS, št. 61/2017.
- [8] Tehnična smernica TSG-1-004:2010 Učinkovita raba energije.
- [9] Atlas okolja. 2018.
http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXL@Arso (Pridobljeno 2. 2. 2018)
- [10] Google Maps. 2018.
<https://www.google.com/maps> (Pridobljeno 4. 2. 2018)
- [11] Splošno o dvojnih fasadah. 2017.
https://en.wikipedia.org/wiki/Double-skin_facade (Pridobljeno 20. 10. 2017)

- [12] Terri Meyer, B. 2003. Understanding the Principles of the Double Façade System, University of Waterloo.
- [13] Trombejeva stena. 2017.
https://sl.wikipedia.org/wiki/Trombejeva_stena (Pridobljeno 22. 10. 2017)
- [14] Pomponi, F., Piroozfar, P., Southall, R., Philp, A., Farrel, E. 2016. Energy performance of Double-Skin Façades in temperate climates: A systematic review and meta-analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews 54, 1525–1536.
- [15] Alberto, A., Ramos, N., Almeida, R. 2017. Parametric study of double-skin facades performance in mild climate countries. Journal of Building Engineering 12, 87-98.
- [16] Barbosa, S., Ip, K. 2014. Perspectives of double skin façades for naturally ventilated buildings: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 40, 1019–1029.
- [17] Slika objekta Occidental Chemical/Hooker Building v New Yorku
<http://www.tboake.com/hooker.html> (Pridobljeno 10. 11. 2017)
- [18] Sanchez, E., Rolando, A., Sant, A., Ayuso, L. 2016. Influence of natural ventilation due to buoyancy and heat transfer in the energy efficiency of a double skin facade building. Energy for Sustainable Development 33, 139–148.
- [19] Gratia, E., De Herde, A. 2004. Natural cooling strategies efficiency in an office building with a double-skin façade. Energy and Buildings 36, 1139–1152.
- [20] Opis objekta Manitoba Hydro Place. 2017.
https://en.wikipedia.org/wiki/Manitoba_Hydro_Place (Pridobljeno 20. 12. 2017)
- [21] Opis objekta One Angel Square. 2017.
https://en.wikipedia.org/wiki/One_Angel_Square (Pridobljeno 20. 12. 2017)
- [22] Opis objekta Auckland's Glittering Green Geyser Office. 2017.
<http://architecturenow.co.nz/articles/geyser-building/> (Pridobljeno 21. 12. 2017)
- [23] Slika objekta Auckland's Glittering Green Geyser Office. 2017.

<https://inhabitat.com/aucklands-glittering-green-geyser-office-wins-new-zealand-architecture-award/>

(Pridobljeno 21. 12. 2017)

[24] Vidic, M. 2016. Idejna zasnova prenove poslovne stavbe SOP KRŠKO v Ljubljani. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo.

[25] Horvat, M. 2017. Dvig energijske učinkovitosti stavbe z dvojno stekleno fasado. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo.

[26] Delo in dom. 2017.

<http://www.deloindom.si/zidane/pomembna-je-pravilna-zasnova-oken> (Pridobljeno 25. 4. 2017)

[27] Standard Svetloba in razsvetljava SIST EN 12464-1:2011.

[28] DesignBuilder. 2017.

<https://www.designbuilder.co.uk/>

[29] Toplotno okolje in ugodje v prostoru.

<http://lab.fs.uni-lj.si/los1/images/vaje/toplotno%20ugodje%20i%20-%20integralna%20ocena.pdf>

(Pridobljeno 15. 4. 2018)

[30] Arso. 2018.

http://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/table/sl/by_location/ljubljana/climate-normals_81-10_Ljubljana.pdf (pridobljeno 10. 3. 2018)