



**Prezračevanje s pomočjo 3D natisnjenega toplotnega izmenjevalca, ki uporablja Gyroid polnilo**

Raziskovalna naloga

Raziskovalno področje: tehnika ali tehnologija (strojništvo)

**Avtor:** Timotej Anton Radanovič

**Mentor:** Željko Oberški

Maribor, 2025

## KAZALO

<b>POVZETEK .....</b>	<b>III</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>III</b>
<b>ZAHVALA.....</b>	<b>IV</b>
<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Kaj je prezračevanje z izmenjevalcem toplote oz. z rekuperacijo.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Kaj je 3D tiskanje in kako deluje?.....</b>	<b>3</b>
<b>1.3. Strukture polnil za 3D tiskanje .....</b>	<b>6</b>
<b>2. METODOLOGIJA DELA .....</b>	<b>7</b>
<b>2.1. Kaj je 3D prezračevalnik s toplotnim izmenjevalcem zraka? .....</b>	<b>8</b>
<b>2.2. Raziskava ponudbe na slovenskem trgu – internetna prodaja.....</b>	<b>9</b>
<b>2.3. Materiali in tehnologija 3D-tiska .....</b>	<b>9</b>
<b>2.4. Načrtovanje in izdelava jedra oziroma modela izmenjevalca.....</b>	<b>10</b>
<b>2.5. Izdelava kontrolnega dela sistema .....</b>	<b>16</b>
<b>2.6. Izračun učinkovitosti izdelka .....</b>	<b>17</b>
<b>2.7. Izdelava izdelka .....</b>	<b>20</b>
<b>2.8. Programiranje sistema Arduino.....</b>	<b>21</b>
<b>2.9. Programiranje mobilne aplikacije .....</b>	<b>22</b>
<b>3. REZULTATI .....</b>	<b>24</b>
<b>3.1. Rezultati meritev našega izdelka .....</b>	<b>25</b>

<b>4. RAZPRAVA IN INTERPRETACIJA REZULTATOV .....</b>	<b>28</b>
<b>5. DRUŽBENA ODGOVORNOST, TRAJNOST IN NAPREDEK.....</b>	<b>31</b>
<b>6. ZAKLJUČEK IN SKLEPI .....</b>	<b>31</b>
<b>7. VIRI IN LITERATURA .....</b>	<b>33</b>
<b>8. PRILOGE .....</b>	<b>35</b>

#### **KAZALO SLIK**

Slika 1: Oblike polnil (vir: internet).....	6
Slika 2: Slika modela toplotnega izmenjevalca zraka v programu Autodesk Fusion 360 (vir: osebni arhiv) .....	10
Slika 3: Slika modela toplotnega izmenjevalca zraka v prerezu v programu Autodesk Fusion 360 (vir: osebni arhiv) .....	10
Slika 4: Določitev ploskev 3D modela vhodnega in izhodnega zraka (vir: osebni arhiv) .....	11
Slika 5: Ena celica Gyroid (vir: osebni arhiv).....	12
Slika 6: Mreža celic (vir: osebni arhiv).....	12
Slika 7 Povečava Boolean Intersecta z Infillom (vir: osebni arhiv).....	13
Slika 8: Artefakti pri mreženju (vir: osebni internet).....	13
Slika 9: Prerez toplotnega prezračevalnika v programu nTopology (vir: osebni arhiv) .....	14
Slika 10: Horizontalni prerez toplotnega prezračevalnika (vir: osebni arhiv) .....	14
Slika 11: Smer gibanja vhodnega in izhodnega zraka (vir: osebni arhiv).....	15
Slika 12: Princip delovanja sistema (vir: internet) .....	15
Slika 13: Vežja za kontrolno releja ventilatorja (vir: osebni arhiv) .....	16
Slika 14: Vežje za napajanje (vir: osebni arhiv).....	17
Slika 15: Komercialni toplotni izmenjevalec (vir: internet) .....	19
Slika 16 Lastni toplotni izmenjevalec (vir: osebni arhiv).....	19
Slika 17:Slika ohišja z elektroniko (vir: osebni arhiv) .....	20
Slika 18: Slika jedra v dveh kosih (vir: osebni arhiv) .....	20
Slika 19: Enostavna skripta za vklop in izklop releja (vir: osebni arhiv) .....	22
Slika 20: Izgled aplikacije za testiranje (vir: osebni arhiv).....	24
Slika 21: Končan toplotni izmenjevalec (vir: osebni arhiv) .....	25
Slika 22: Merjenje pretoka, temperature in vlažnosti (vir: osebni arhiv).....	26
Slika 23: Model mešanja toplote (vir: internet) .....	28
Slika 24: Priloga 1 – shema vezja (vir: osebni arhiv) .....	35

#### **KAZALO TABEL**

Tabela 1: Tabela stroškov za kontrolno enoto .....	29
Tabela 2. Tabela stroškov uporabljenih delov.....	29

## **POVZETEK**

Vse več lastnikov obstoječih objektov ali novogradenj si želi imeti prezračevanje z rekuperacijo, kar naj bi zagotavlja večje prihranke energije in udobnejše bivanje.

V tej raziskovalni nalogi bomo raziskali možnosti izdelave centralnega prezračevalnega sistema, s 3D natisnjanim toplotnim izmenjevalcem, ki uporablja Gyroid polnilo. Projekt se osredotoča na energetske učinkovitost in stroškovno primerjavo med domačimi narejenimi rešitvami in komercialnimi sistemi. Uporabljen je 3D tiskalnik, ki uporablja FDM tehnologijo 3D tiskalnika in PLA filament. Opravili bomo izračune za učinkovitost ter modelirali v programu Fusion 360 in nTopology. Toplotno izmenjevalni sistem vključuje Arduino Nano integrirano razvojno ploščo za nadzor prezračevanja ter Bluetooth za povezljivost. Cilj je raziskati ali je ta rešitev učinkovita in cenovno ugodna.

Ključne besede: prezračevanje, 3D tisk, toplotni izmenjevalec, Gyroid polnilo, rekuperator

## **SUMMARY**

More and more owners of existing or new buildings want to have ventilation with recuperation, which should provide greater energy savings and more comfortable living.

In this research project, we will investigate the possibility of manufacturing a central ventilation system with a 3D printed heat exchanger using Gyroid filler. The project focuses on energy efficiency and cost comparison between home-made solutions and commercial systems. An FDM 3D technology printer with PLA filament is used. We will perform efficiency calculations and model the system in Fusion 360 and nTopology software. Heat exchange system includes an Arduino Nano platform for ventilation control and Bluetooth for connectivity. The goal is to investigate whether this solution is effective and cost-effective.

Key words: ventilation, 3D printing, heat exchanger, Gyroid infill, recuperator

## ZAHVALA

Izjemno se zahvaljujem svojemu mentorju, ki mi je pomagal pri določenih delih naloge. Zahvaljujem se tudi staršem, ki so me spodbujali, da nadaljujem z nalogo, mojemu stricu za pomoč pri kodiranju kontrolne plošče izmenjevalca ter profesorici slovenščine, ki je pregledala raziskovalno nalogo. Zahvaljujem se tudi skupini nTopology, da so mi dodelili akademsko licenco za njihov program nTopology. Njihova internet stran je: <https://www.ntop.com/>.

## **1. UVOD**

Cilj naloge je raziskovanje koncepta 3D natisnjene centralnega prezračevanja z izmenjevalcem toplote, ki uporablja »Gyroid« polnilo. Projekt me je pritegnil, ker smo v naši hiši želeli vgraditi centralno prezračevanje z izmenjevalcem toplote in ko sem iskal komercialne naprave na trgu, sem ugotovil, da so te naprave dokaj drage, fizično velike in povezane z dodatnimi stroški.

Pri raziskovanju kako izdelati toplotni izmenjevalec sem naletel na že izdelano študijo z naslovom Numerična in eksperimentalna raziskava Gyroidnega toplotnega izmenjevalca [1]. »Ta študija predstavlja nove vrste toplotnega izmenjevalca, katerega jedro je zgrajeno na osnovi trojno periodične minimalne površinske strukture. Jedro tega izmenjevalca je zgrajeno kot periodična struktura, ki temelji na rešetki gyroidnega tipa in je izdelano s tehnologijo laserske fuzije s prašno posteljo« [1]. V študiji so jedro izmenjevalca izdelali iz nerjavnega jekla. Sam sem uporabil PLA polnilo.

Za Gyroid obliko polnila sem se odločil, ker zagotavlja izjemno veliko površino toplotnega izmenjevalca, kar zagotavlja učinkovit prenos toplote med vhodnim in izhodnim zrakom. Velika površina izmenjevalca je pri toplotni izmenjavi izredno pomembna, saj vpliva na samo učinkovitost celotne naprave.

Namen naloge je raziskati ali je doma izdelano centralno prezračevanje z izmenjevalcem toplote, s pomočjo 3D natisnjene toplotnega izmenjevalca s prezračevanjem iz materiala PLA, res cenejše ali ga je ceneje kupiti, s predpostavko, podobne toplotne učinkovitosti izmenjevalca. Pri tem je treba upoštevati, da lahko pri lastni izdelavi upoštevamo svoje želje, pri nakupu pa imamo možnost kupiti samo tisto, kar je na trgu.

### **1.1. Kaj je prezračevanje z izmenjevalcem toplote oz. z rekuperacijo**

Ozaveščenost ljudi o negativnih vplivih neučinkovite gradnje na okolje, se vse bolj povečuje. Zato se sodobni gradbeni trendi usmerjajo v energetske varčne gradnje, ki zmanjšuje obratovalne stroške in toplotne izgube. Uporaba kakovostnih materialov prispeva k boljšemu zadrževanju toplote, ki bi sicer uhajala v okolje. Vendar pa ima ta pristop tudi slabosti – prevelika zrakotesnost prostorov lahko negativno vpliva na

zdravje in počutje, saj lahko vodi do kopičenja škodljivih plinov in kemičnih snovi. Pomanjkanje prezračevanja poslabša kakovost zraka, kar vpliva na udobje bivanja, produktivnost in splošno dobro počutje.

Zaradi potrebe po izboljšanju kakovosti zraka, so na trgu na voljo prezračevalni sistemi s prisilnim oz. mehanskim prezračevanjem. Njihova glavna prednost je avtomatizacija, ki omogoča prilagojeno in učinkovito prezračevanje, glede na dejanske potrebe. Poleg tega, je pomembno izbrati sistem, ki deluje tiho, porabi malo energije ter ohranja toploto iz odpadnega zraka, ki zapušča prostor in jo prenese na svež zrak, ki prihaja od zunaj.

Prezračevalni sistemi z vgrajenim rekuperatorjem omogočajo vračanje toplote odpadnega zraka, kar zmanjša toplotne izgube. Nekateri rekuperatorji lahko zadržijo več kot 90 % toplote, kar omogoča optimalno ravnovesje med zrakotesnostjo sodobnih gradbenih materialov in učinkovitim prezračevanjem. Posledično vodi to do občutnih prihrankov pri stroških ogrevanja, zlasti v zimskem času, ko so temperaturne razlike med notranjimi prostori in zunanjim okoljem največje. V prostorih je manj vlage in plesni, posledično sta tudi boljša počutje in zdravje [2].

Sistem prezračevanja z rekuperacijo je običajno sestavljen iz naslednjih glavnih komponent:

- Izmenjevalca toplote: To je srce sistema, ki omogoča prenos toplote. Izmenjevalci so lahko različnih vrst ploščati, križni ali rotacijski.
- Ventilatorjev: Ti omogočajo stalni pretok zraka skozi sistem. Ventilatorji črpajo notranji zrak iz prostorov in hkrati dovajajo svež zrak iz zunanosti.
- Filtrov: Da v notranje prostore ne bi prinesli prah, smog ali druge onesnaževalce, so prezračevalni sistemi pogosto opremljeni s filtri za čiščenje svežega zraka, pred vstopom v bivalne prostore.
- Kanalov in cevi: Prezračevalni kanali omogočajo, da se zrak preusmeri do različnih prostorov. Lahko so nastavljivi, kar omogoča boljši nadzor nad porazdelitvijo zraka po stavbi.

- Nadzornega sistema: Nekateri napredni sistemi imajo vgrajene senzorje za merjenje vlage, temperature in koncentracije CO<sub>2</sub>, kar omogoča prilagajanje prezračevanja, glede na dejanske potrebe.

Poznamo dva različna načina oz. izvedbi prezračevalnega sistema s toplotno rekuperacijo, ki sta uporabljena po svetu. To sta:

- Lokalni prezračevalni sistem. Sistem je manjši ter tudi cenejši, saj uporablja manjše jedro ter nima tako velikega pretoka zraka. Je pa manj učinkovit, saj spreminja smer vrtenja pretoka zraka. Kot pove že samo ime »lokalni« pomeni, da je namenjen za prezračevanje posameznega prostora.
- Centralni prezračevalni sistem. Uporabljen je v večjih objektih, kjer potrebujemo večje pretoke zraka, torej prezračuje vse prostore. Najlažje se ga da vgraditi pri novogradnjah. Je tudi bolj učinkovit, saj je ves čas vklopljen in ves čas delovanja piha v obe smeri. V tem primeru je celoten sistem prezračevanja centraliziran, kar pomeni, da je en izmenjevalec toplote povezan z več prostori, preko kanalskega sistema.

## **1.2. Kaj je 3D tiskanje in kako deluje?**

3D tiskanje je tiskanje predmeta oz. strokovno povedano, proces izdelave tridimenzionalnih objektov, s pomočjo računalniško podprtih modelov. Pri tem se uporabljajo posebni tiskalniki, ki ustvarijo predmet plast za plastjo, pri čemer se material, kot so plastika, kovina ali celo beton, topi in nanese na površino, dokler se objekt ne oblikuje v željeno obliko [3]. V primeru betona, se beton ne topi, temveč je proces drugačen.

Postopek je zelo priljubljen, ker omogoča izdelavo kompleksnih oblik, ki bi jih bilo težko narediti z tradicionalnimi metodami obdelave. Uporablja se v različnih industrijah, kot so avtomobilska, medicinska, v gradbeništvu, umetnosti in celo v vsakdanjem življenju, za izdelavo prototipov ali personaliziranih predmetov. Tiskanje se običajno začne z digitalnim modelom, ki ga ustvarimo s pomočjo 3D skenerja ali programske opreme za 3D modeliranje. Ko je model ustvarjen, ga tiskalnik »natisne« s plastmi materiala, ki jih nanese eno na drugo, dokler ni izdelek končan.

Pri 3D tisku se uporablja širok spekter različnih materialov, ki so prilagojeni specifičnim potrebam in zahtevam tiskanja. Nekateri najpogostejši tipi materialov za 3D tisk so, kot navajajo pri Formlabs:

#### 1. **ABS (Akrilonitril-butadien-stiren):**

- Zelo trpežen in odporen na visoke temperature.
- Primeren za izdelavo robustnih delov, ki morajo biti mehansko odporni in trdni.
- Ima višjo temperaturo taljenja kot PLA in je nekoliko zahtevnejši za tiskanje, saj se lahko krči in zvija.

#### 2. **PLA (Poliakidna kislina):**

- Eden izmed najbolj priljubljenih materialov za 3D tiskanje, zaradi svoje enostavnosti uporabe.
- Ekološki, saj je biološko razgradljiv.
- Ima nizko temperaturo taljenja, kar omogoča tiskanje pri nizkih temperaturah.
- Primerno za izdelavo prototipov, okrasnih predmetov in enostavnih funkcionalnih delov.

#### 3. **PETG (Polietilen tereftalat glikol):**

- Ponuja dobre lastnosti, tako PLA kot ABS, a je lažji za tiskanje kot ABS.
- Odporen je na udarce, kemikalije in vlago.
- Lahko je varen za hrano.
- Idealen za izdelavo funkcionalnih delov in predmetov, ki morajo biti vodoodporni.

#### 4. **Najlon:**

- Odlikuje se po izjemni trdnosti, fleksibilnosti in odpornosti proti obrabi.
- Pogosto se uporablja za industrijske dele, zobnike, mehanizme in druge delce, ki morajo prenesti visoke obremenitve (udarce in vročino).

#### 5. **TPU (Termoplastični poliuretan):**

- Elastičen in fleksibilen material.

- Idealno za tiskanje predmetov, ki morajo biti upogljivi ali gnetljivi, kot so obutev, zaščitne obloge, tesnila in podobno.

#### **6. HIPS (Polistiren visoke odpornosti):**

- Pogosto se uporablja kot podporni material v kombinaciji z ABS, saj je enostaven za raztapljanje v limonini soli (raztopi se v kemikaliji limonen).
- Tiskanje s HIPS omogoča ustvarjanje kompleksnih geometrij in natančne podrobnosti, pri tem pa se podpora enostavno odstrani.

#### **7. PVA (Polivinil alkohol):**

- Vodotopen material, pogosto se uporablja kot podporni material za tiskanje s FDM (Fused Deposition Modeling) tehnologijo.
- Primeren za kompleksne strukture, z notranjimi prostori, saj se lahko enostavno raztopi v vodi.

#### **8. Carbon fiber (ogljikova vlakna):**

- Ogljikova vlakna se pogosto dodajajo osnovnim materialom, kot so PLA, ABS ali najlon, da izboljšajo trdnost, togost in odpornost na visoke temperature.
- Tiskanje s tem materialom zahteva posebne šobe, saj so vlakna abrazivna in lahko poškodujejo običajne šobe.

#### **9. Kovine (npr. nerjavno jeklo, titanova zlitina, aluminij):**

- 3D tiskanje z metalnimi polnili je bolj zapleteno, vendar omogoča ustvarjanje funkcionalnih delov iz kovinskih materialov.
- Uporablja se predvsem za proizvodne aplikacije in prototipe, kjer so potrebne lastnosti kovin, kot so trdnost, odpornost na toploto in mehanske lastnosti.

#### **10. Wood-filled (polnila na osnovi lesa):**

- Materiali, ki vsebujejo lesna vlakna, kot so lesni prah, v kombinaciji s PLA.
- Dajo končnemu izdelku videz in občutek pravega lesa.

- Pogosto se uporabljajo za dekorativne predmete ali umetniške stvaritve.

To so le nekateri izmed najpogosteje uporabljenih materialov v 3D tisku. Različni materiali omogočajo tiskanje širokega spektra predmetov, od funkcionalnih delov do umetniških ustvarjalnih projektov [4].

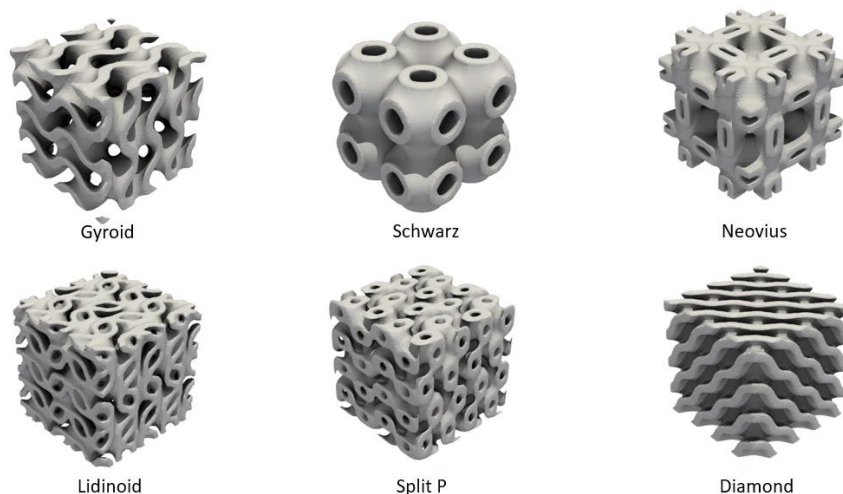
Ta material, ki se uporablja v postopku 3D tiskanja, je oblikovan v tanke žice ali niti, ki jih imenujemo filament.

### 1.3. Strukture polnil za 3D tiskanje

Obstaja več različnih struktur polnil:

- Gyroid
- Schwarz,
- Diamond,
- Lidinoid,
- Split P,
- Neovius.

Geometrijske oblike polnil v sliki:



Slika 1: Oblike polnil (vir: internet)

Vsaka izmed njih nudi, glede na svojo geometrijsko obliko, visoko razmerje med površino in prostornino ter odprto rešetkasto strukturo, ki spodbuja mešanje

tekočin/plinov, kar je ključni dejavnik za učinkovit prenos toplote, vendar so rezultati pretoka pri vseh različni ter imajo različne lastnosti trdnosti [5].

Med temi smo se, za jedro naše prezračevalne naprave, odločili za Gyroid polnilo, saj nam je dal največjo površino ter ga je bilo najlažje natisniti v 3D.

Za ohišje vezja in njegov pokrov pa smo izbrali osnoven vzorec polnila, poimenovan Rectliner, ki ustvari pravokotno mrežo tako, da eno plast natisne v eno smer, naslednjo plast zasuka za 90° itd. Na ta način prihrani filament in ne nabira materiala na križiščih (za razliko od mreže) in se tudi najhitreje natisne.

## **2. METODOLOGIJA DELA**

Začeli smo z raziskovanjem, kaj je prezračevalnik s toplotno rekuperacijo in kaj nam ponuja trg. Izbira izdelave te vrste izdelka je temeljila na želji, o vgradnji centralnega prezračevanje s križnim izmenjevalcem toplote, v naši hiši, v domači izvedbi. Izbira vrste križnega izmenjevalca toplote temelji na tem, da ta vrsta omogoča bolj intenziven prenos toplote, saj se zrak iz notranjosti in zrak iz zunanosti med seboj prepletata, pri čemer je še vedno preprečeno neposredno mešanje zraka.

Zato smo izdelali 3D model izdelka, v programu Autodesk Fusion 360 in pripravili seznam del ter se lotili dela.

Ko smo imeli 3D sliko izdelka, smo izdelali načrt vezja ter njegovo izdelavo naročili pri podjetju JLCPCB. Sledilo je programiranje mikroprocesorja ter njegovi končni popravki. Nato smo zaključili s tiskanjem ohišja vezja in jedra toplotnega izmenjevalca zraka, v 3D tiskalniku. Na koncu smo sestavili izdelek in ga preizkusili ali deluje.

Seznam dodatnih delov, ki smo jih potrebovali za izdelavo oz. sestavo lokalne prezračevalne naprave z rekuperacijo toplote:

- 1,5k ohm upor 1/4W 2 kosa
- 1N4007 dioda 2 kosa
- S8050 TO92 NPN tranzistor
- BLX-A ohišje za varovalko

- 0,1A steklena varovalka
- Modul za napajanje HLK-15M05C
- Dioda 1N4007
- Mikrokontroler Arduino Nano V3
- Bluetooth modul za brezžično komunikacijo HC-05
- Senzor za CO<sub>2</sub> MQ135
- Senzor temperature in vlažnosti DHT22 2 kosa
- Priključna spojka za Arduino
- Kabli s konektorji
- Rele (SRD-05VDC-SL-C)
- 0,96 palčni (64×128 mm) OLED zaslon
- Podnožja za kable 3p 10 kosov
- Podnožja za kable 2p 10 kosov
- AC kabel
- Tiskano vezje
- Kondenzator 470uF elektrolitski 16V
- Filament 4 kg
- Ventilator EK125 2 kosa

Za 3D tiskanje ohišja vezja, pokrova ohišja vezja in celotnega jedra, smo uporabili 3D tiskalnik Bambu lab P1S, z dodanim AMS sistemom (sistem avtomatične menjave filamenta).

### **2.1. Kaj je 3D prezračevalnik s toplotnim izmenjevalcem zraka?**

3D prezračevalnik s toplotnim izmenjevalcem zraka, je naprava izdelana s 3D tiskalnikom, ki prisilno prezračuje prostor ali sobo in s tem omogoča, da se odvajata slab zrak in odvečna vlaga iz prostora ter se dovaja svež zrak.

Naloga toplotnega izmenjevalca oz. jedra v prezračevalni napravi je, da na vhodni strani (kjer prihaja svež zrak) odda akumulirano toploto v lamelah in da na izhodni strani sprejme toploto zraka (odpadni zrak ali zrak prostora) in ga akumulira v lamelah, pri tem pa se svež zunanji zrak in zrak iz prostora ne mešata. S tem se ohranja bivalna temperatura v prostoru brez večjih temperaturnih nihanj.

## 2.2. Raziskava ponudbe na slovenskem trgu – internetna prodaja

Na internetu smo iskali ponudbe, ki bi ustrezale našim potrebam in našli naslednje primere cene izdelkov brez vključene montaže pri Jantar trade [6] :

1. Centralni rekuperator VENTS VUT 300 H MINI

Trenutna cena: 2.143,30 € z vključenim 22 % DDV

2. Centralni rekuperator VENTS VUT 300 H2 mini EC A14

Trenutna cena: 1.265,14 € z vključenim 22 % DDV

3. Centralni rekuperator VENTS VUT 100 P MINI

Trenutna cena: 565,59 € z vključenim 22 % DDV

## 2.3. Materiali in tehnologija 3D-tiska

Poznamo več kategorij 3D tiska, navedeni so najpogostejši trije:

- FDM – Fused deposition modeling (uporaba filamenta na kolutih),
- SLA – Stereolithography (uporaba tekoče UV smole),
- SLM – Selective laser melting (uporaba železnega prahu).

V raziskovalni nalogi smo se osredotočili na FDM (Fused deposition modelling) tiskanje, saj je ta vrsta 3D tiskalnikov najpogostejša ter cenovno najbolj ugodna. Uporabili smo PLA (polilaktična kislina) plastiko, v obliki filamenta, saj je cenovno najugodnejša ter ima toplotno prevodnost 0,16 W/mK [7]. In je okolju prijazna saj je biološko razgradljiv material, izdelan iz obnovljivih virov, kar zmanjšuje vplive na okolje v primerjavi s standardnimi plastičnimi materiali [8].

Če bi želeli povečati učinkovitost, bi uporabili posebni TCP (toplotno prevodni polimer) filament, ki ima toplotno prevodnost kar 6 W/mK , v primerjavi z nerjavnim jeklom, ki ima toplotno prevodnost od 15 - 30 W/mK [9].

Naslednja najboljša izbira, za izdelavo toplotnega izmenjevalca, je SLA tiskanje, saj lahko uporabimo smolo, z dodanimi bakrenimi oz. grafitnimi delci.

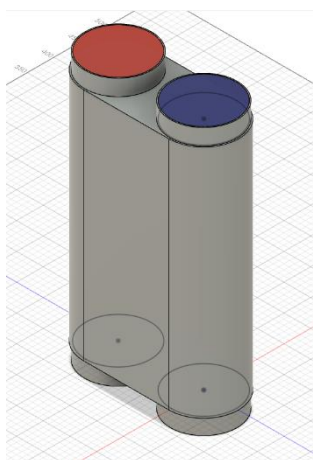
Če bi želeli dobiti najvišjo toplotno prevodnost ter najmanjše toplotne izgube, bi uporabili SLM tiskanje, vendar tega procesa nismo uporabili, saj je predrag za našo raziskovalno nalogo.

## 2.4. Načrtovanje in izdelava jedra oziroma modela izmenjevalca.

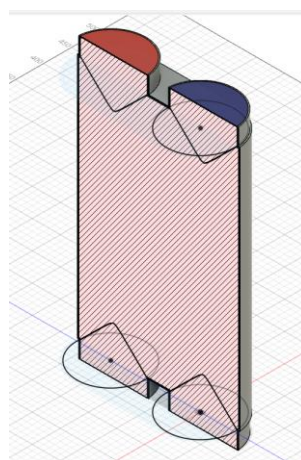
Za izdelavo 3D modela smo uporabili program Autodesk Fusion 360.

V tem programu smo definirati obliko izmenjevalca toplote ter ločili posamezne dele sistema. Določiti oz. narediti smo morali tudi »tekočinske domene«, da smo lahko kasneje generirali »baffle« (zapore, da se topel in hladen zrak ne mešata med seboj).

Na sliki 2 je prikazan model toplotnega izmenjevalca zraka v programu Autodesk Fusion 360 in na sliki 3 model v prerezu. Rdeča barva pomeni topel zrak, ki gre ven, modra pa hladen, ki gre noter.



Slika 2: Slika modela toplotnega izmenjevalca zraka v programu Autodesk Fusion 360 (vir: osebni arhiv)



Slika 3: Slika modela toplotnega izmenjevalca zraka v prerezu v programu Autodesk Fusion 360 (vir: osebni arhiv)

Nato smo 3D model toplotnega izmenjevalca prenesli v program nTopology, kjer smo določili vse dele modela.

Omeniti moramo, da je program nTopology odličen za risanje kompleksne geometrije, omogoča več možnosti oblikovanja in hitro optimiziranje dizajnov [10].

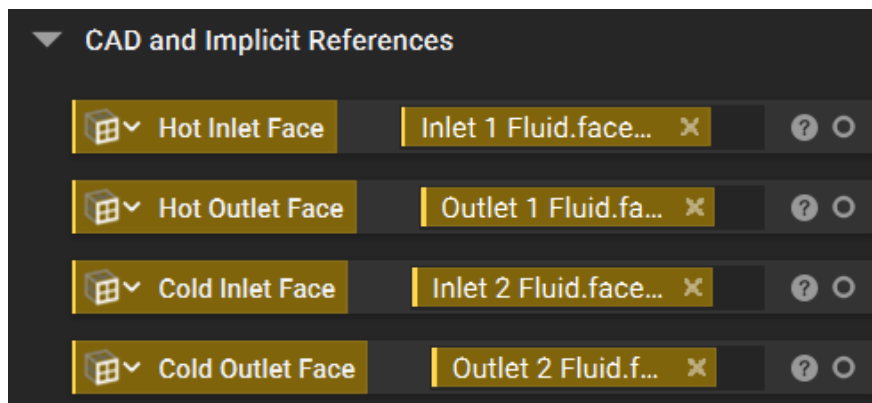
Vse dele 3D telesa smo spremenili v »Implicit« telesa (implicitna telesa so matematična predstavitev krivulj in volumnov, ki omogočajo zelo majhne datoteke, ki jih je mogoče obdelati), ker program ne podpira direktnih CAD modelov.

Določili smo tudi t.i. obraze Inlet delov ter Outlet delov, s čimer smo matematično in geometrijsko določili topla in hladna območja toplotnega izmenjevalca in s tem tudi tok zraka.

Obraz ali FACE je ploskev, inlet je vhodni del, outlet je izhodni del. To pomeni, da smo sami določili imena ploskev na modelu v programu in sicer:

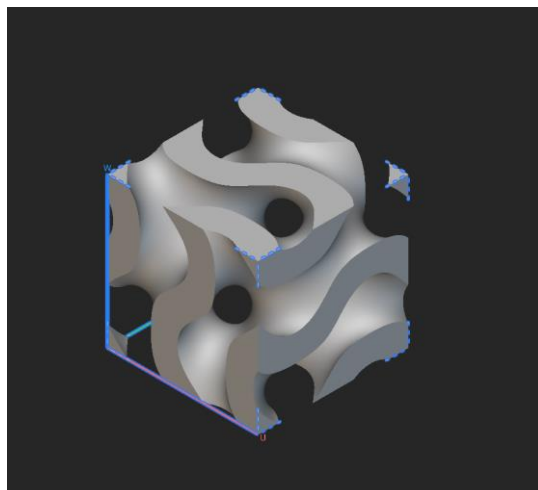
- Hot Inlet Face = ploskev vhodnega dela toplega zraka.
- Hot Outlet Face = ploskev izhodnega dela toplega zraka.
- Cold Inlet Face = ploskev vhodnega dela hladnega zraka.
- Cold Outlet Face = ploskev izhodnega dela hladnega zraka.

Na sliki 4 vidimo določitev ploskev 3D modela vhodnega in izhodnega zraka.

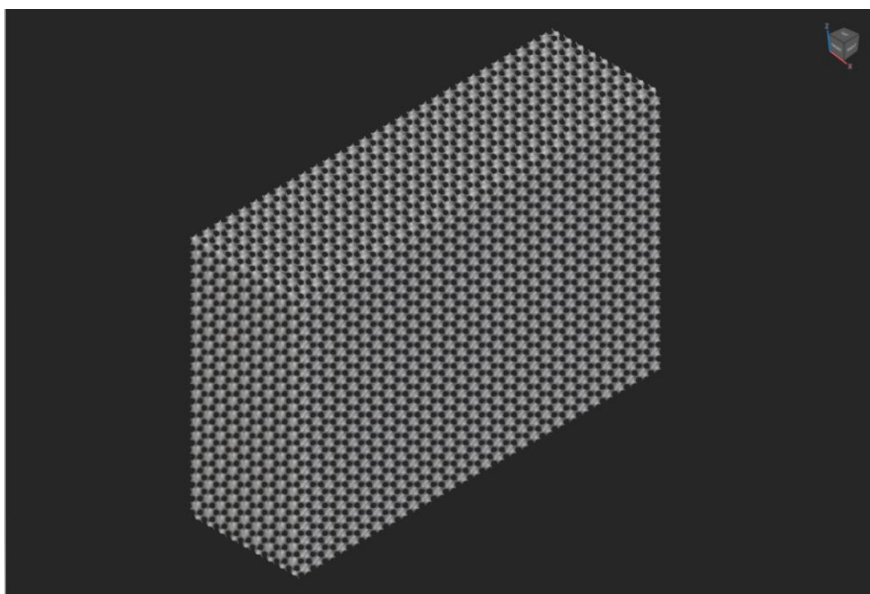


Slika 4: Določitev ploskev 3D modela vhodnega in izhodnega zraka (vir: osebni arhiv)

Nato smo pričeli z matematičnim izračunom območja polnila. Območje polnila smo naredili tako, da smo ustvarili Gyroid celico na sliki 5, ki smo jo kopirali po celotni mreži celice na sliki 6.



*Slika 5: Ena celica Gyroid (vir: osebni arhiv)*

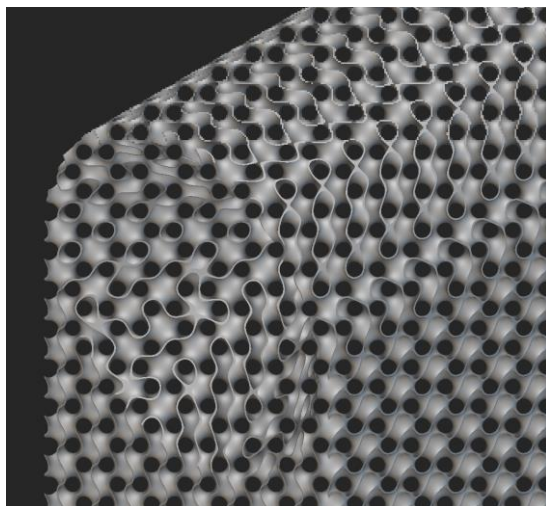


*Slika 6: Mreža celic (vir: osebni arhiv)*

Mreža celice predstavlja volumen izmenjevalca zraka. Nato smo to mrežo odrezali, da ni bila velika kocka, s pomočjo »Boolean intersect« operacije, kot drugo telo smo uporabili Infill del. Na sliki 7 vidimo povečavo Boolean Intersecta, z Infillom.

Ker imajo FDM tiskalniki težave pri tiskanju ostrih kotov, smo sami določili razmerje velikosti celice proti stisljivosti po lastni presoji, saj se ostri koti, ki so tiskani v zraku, ne natisnejo ostro, temveč se trgajo.

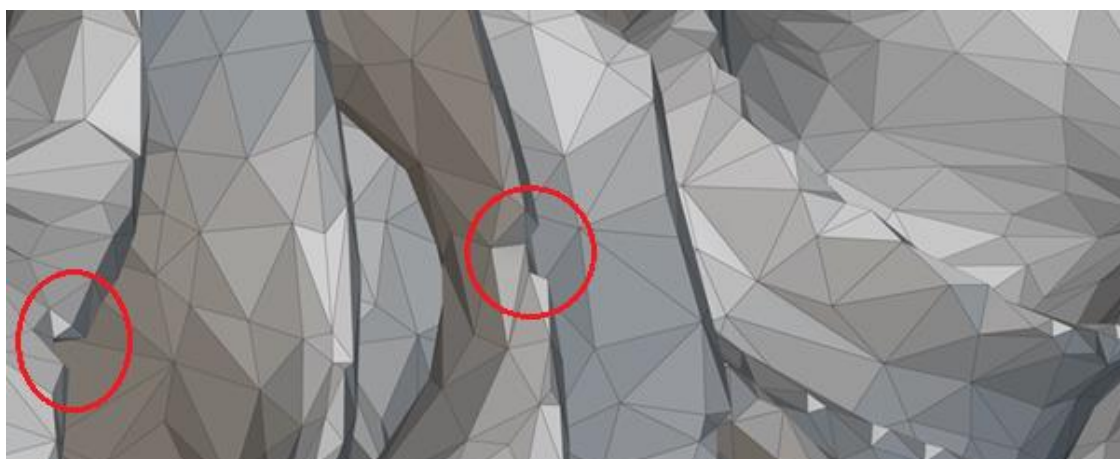
Določili smo tudi tekočinska polja za topli in hladni del izmenjevalnika »Hot Fluid« ter »Cold Fluid«, da smo ju kasneje izolirali.



*Slika 7 Povečava Boolean Intersecta z Infillom (vir: osebni arhiv)*

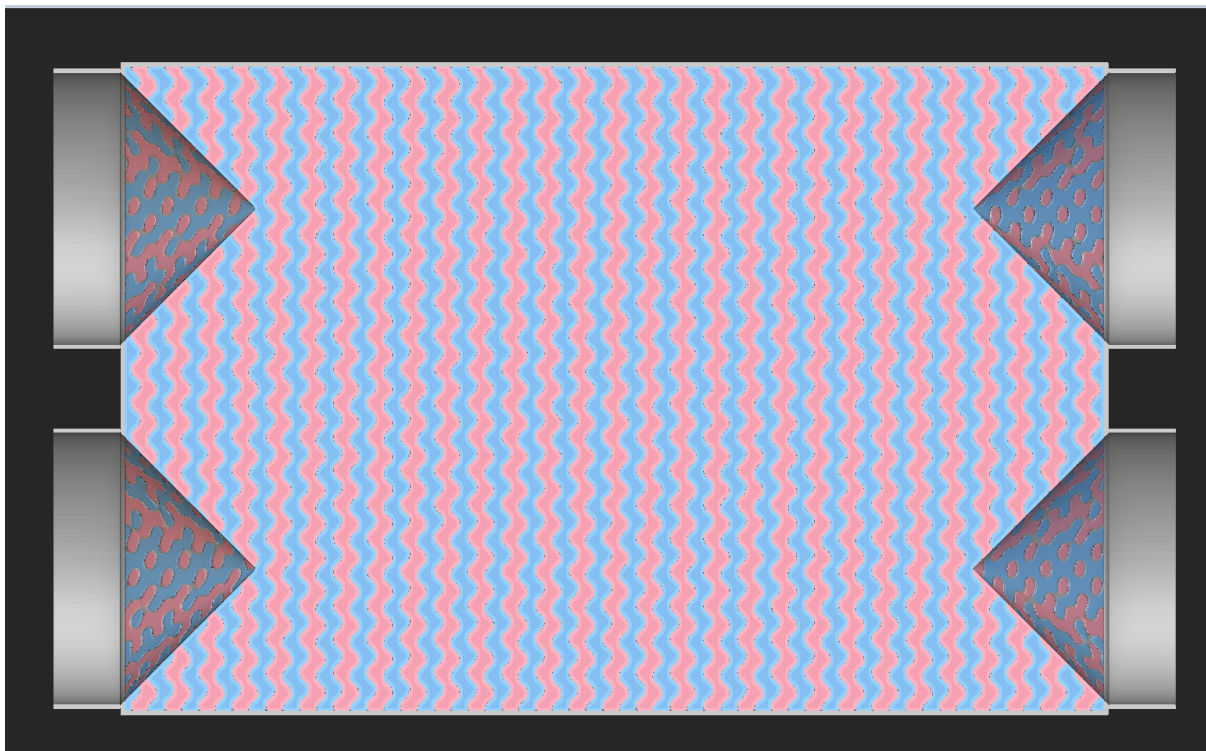
Naslednji korak je vključeval izdelavo »Baffelov« oz. zapor, ki ločujejo hladen tekočinski del od vročega. Zaporam smo določili prostornino in jih generirali. Z uporabo zapor preprečujemo mešanje toplega in hladnega zraka

Zaradi velikosti toplotnega izmenjevalca, smo celoten model morali razdeliti na dve polovici in jih posamično tiskali s 3D tiskalnikom, saj je naš 3D tiskalnik premajhen za tiskanje tako velikega predmeta. Pred tiskanjem, smo od vsakega kosa, s strani, odrezali 2 milimetra polnila, da smo se znebili artefaktov pri mreženju izdelka. Artefakti pri mreženju so vidni na sliki 8 in pomenijo napake, ki smo se jih želeli znebiti. Za ta obrez, smo pred mreženjem že dodali, v vsak kos modela 2 mm prekrivanja, kjer smo ga potem v rezalniku odrezali in začeli 3D tiskati.

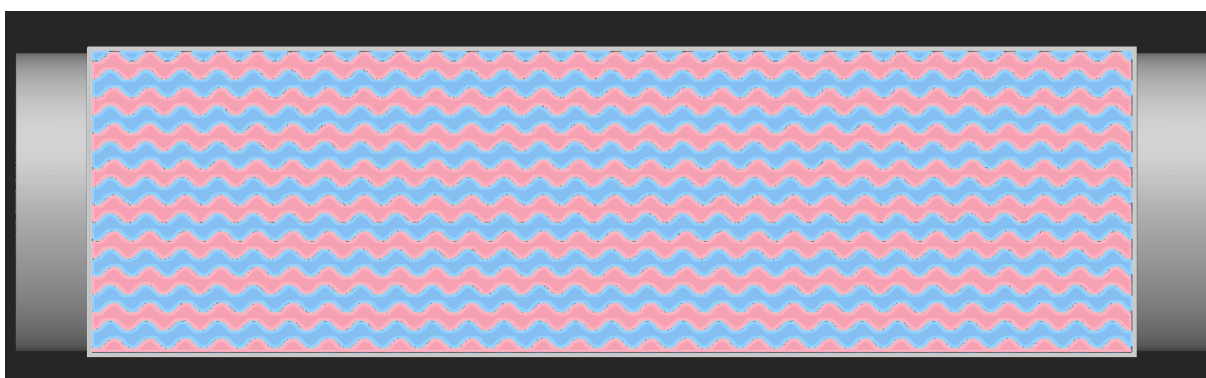


*Slika 8: Artefakti pri mreženju (vir: osebni internet)*

Na sliki 8 vidimo prerez toplotnega prezračevalnika v programu nTopology pred tiskom, kjer modra barva predstavlja hladen zrak, rdeča barva pa topel zrak. Horizontalni prerez vidimo na sliki 9.

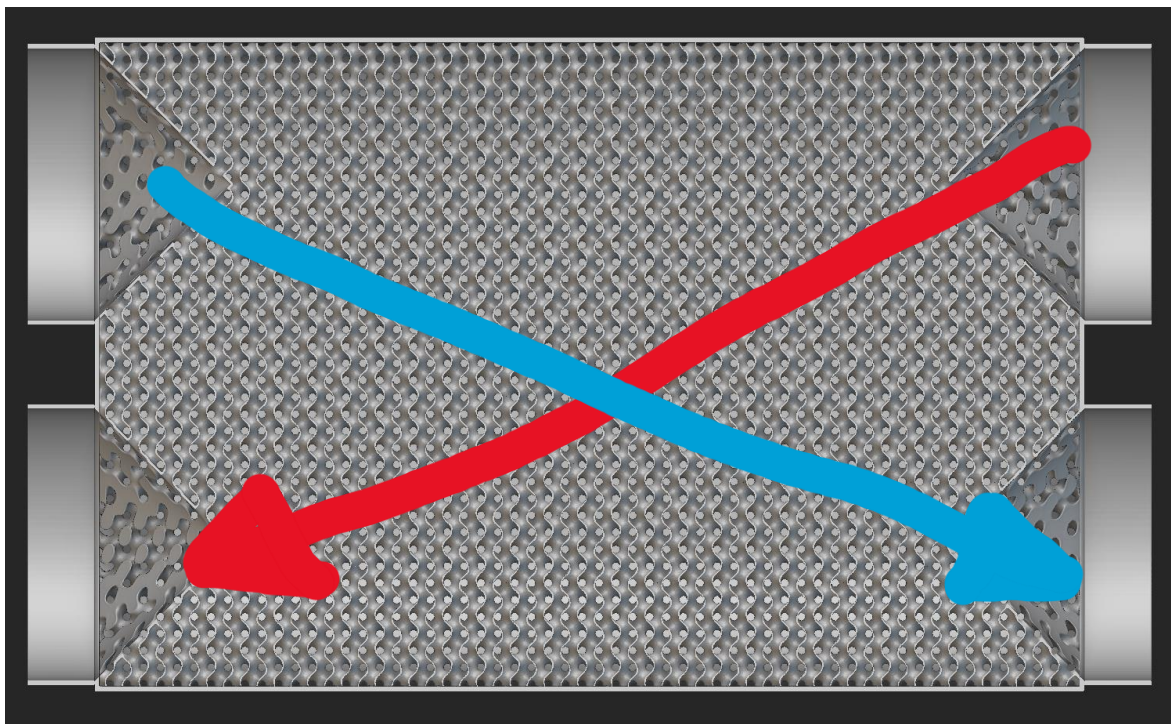


*Slika 9: Prerez toplotnega prezračevalnika v programu nTopology (vir: osebni arhiv)*



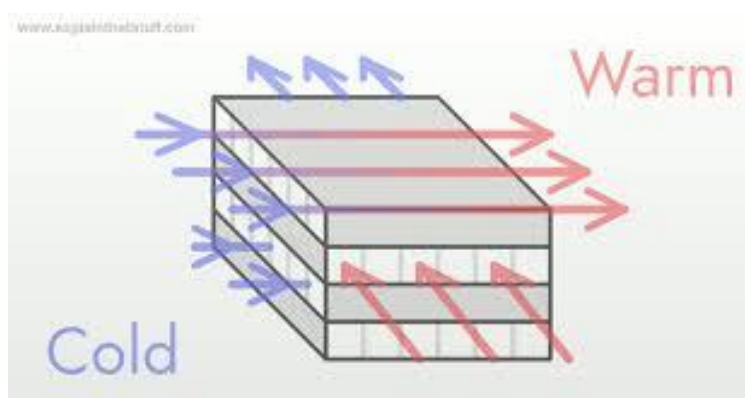
*Slika 10: Horizontalni prerez toplotnega prezračevalnika (vir: osebni arhiv)*

Na sliki 11 je prikazan prerez brez vrisanega hladnega in toplega zraka, kjer je vidna struktura izdelka in so označene smeri gibanja toplega z rdečo in hladnega zraka z modro barvo.



Slika 11: Smer gibanja vhodnega in izhodnega zraka (vir: osebni arhiv)

Na sliki 12 je predstavljen princip delovanja sistema, in sicer je z rdečo barvo označena smer gibanja toplega zraka in z modro barvo smer hladnega zraka.



Slika 12: Princip delovanja sistema (vir: internet)

Vgrajenega modula z oznako NRF24I01+ nismo uporabili, saj BLE (Bluetooth Low Energy), ki porabi manj energije kot standardni, ni dobro deloval. Na spodnji del vezja smo zato dodali modul HC-05, za standardno Bluetooth komunikacijo.

Bluetooth se uporablja za spreminjanje mejne vrednosti nivojev plinov (visoka koncentracija in nizka koncentracija žlahtnih plinov) ter za ročni nadzor ventilatorjev.

Natančnejši princip delovanja si lahko preberete na spletni strani:

<https://www.explainthatstuff.com/heat-recovery-ventilation.html>

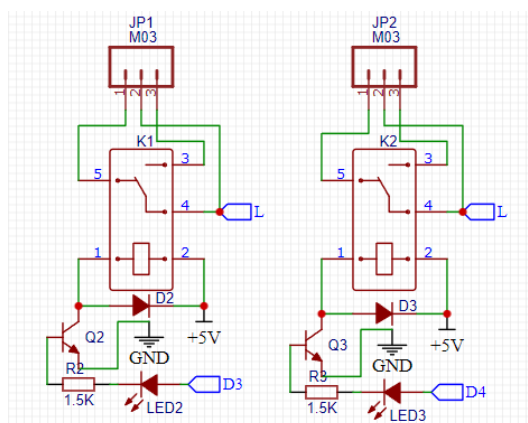
## 2.5. Izdelava kontrolnega dela sistema

Za kontroliranje vezja smo uporabili za mikroprocesor Arduino Nano V3.0, z integriranim NRF24I01+ modulom, pri čemer smo uporabili dodatni modul HC-05, za Bluetooth komunikacijo. Vgrajenega NRF24I01+ nismo uporabili, saj BLE ni dobro deloval.

Vezje smo začeli graditi v programu Easy-EDA. Shema vezja se nahaja v Prilogi 1.

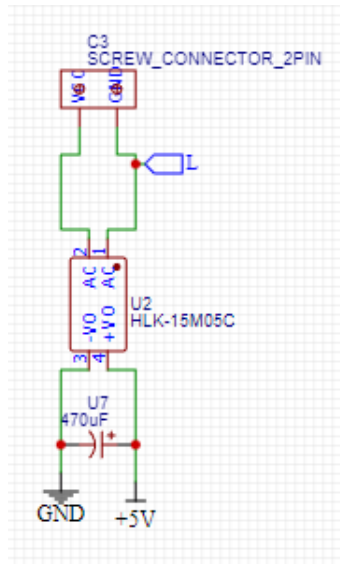
V samem vezju so potrebni dodatni elektronski elementi za krmiljenje releja, ki kontrolira vklop in izklop vhodnih in izhodnih ventilatorjev. Shema vezja za kontrolo releja ventilatorja je podana na sliki 13.

Za natančnejši nadzor izmenjevanja zraka smo predvideli ločene ventilatorje, vendar smo kasneje ugotovili, oba delujeta enako.



Slika 13: Vezja za kontrolo releja ventilatorja (vir: osebni arhiv)

Za napajanje (vhod 220V AC, izhod 5V DC) smo uporabili komponento HLK-15M05C. To je izolacijsko stikalo za zmanjšanje napetosti in napajalni pretvornik ter je stabilizacijsko vezje EMC, kar pomeni, da zagotavlja stabilno izhodno napetost in tok. Vezje s to komponento za napajanje je na sliki 14.



Slika 14: Vezje za napajanje (vir: osebni arhiv)

Uporabili smo dva senzorja, za temperaturo in vlažnost DHT22 ter senzor za merjenje vsebnosti plina CO<sub>2</sub>, v notranjem zraku MQ-135. Za nadaljnje potrebe smo dodali še priključek za MQ-135 senzor, za nadziranje vsebnosti CO<sub>2</sub>-ja v zunanjem zraku, vendar ga nismo uporabili v končni verziji. Za shemo vezja si poglejte Prilogo 1.

Vezje vsebuje tudi priključek za 0,96 palčni (64×128 mm) OLED zaslon, ki smo ga uporabili za prikaz merjenih vrednosti temperature in vlage. Na spodnjo stran tiskanega vezja smo povezali tudi Bluetooth modul.

## 2.6. Izračun učinkovitosti izdelka

Za izračun učinkovitosti izdelka potrebujemo izračunati toplotno upornost izdelka [11].

Po spodnji enačbi izračunamo toplotno prevodnost stene  $R_{wall}$ :

$$R_{wall} = \frac{t}{\lambda A} \quad (1)$$

$$R_{wall} = \frac{0,0004 \text{ m}}{0,13 \frac{W}{mK} \times 5,54 \text{ m}^2}$$

$$R_{wall} = 0,0005540 \frac{K}{W}$$

$t = 0,0004 \text{ m}$  (debelina TPMS)

$\lambda = 0,16 \text{ W/mK}$  (toplotna prevodnost PLA)

$A = \text{površina prenosa toplote } 5,52 \text{ m}^2$

Izračun skupnega koeficienta prenosa toplote (U):

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_{air}} + R_{wall} + \frac{1}{h_{air}} \quad (2)$$

$h_{air} \approx 30 \text{ W/m}^2\text{K}$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{30} + 0,0005540 + \frac{1}{30}$$

$$U = \frac{1}{0,067572}$$

$$U = 14,8876 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Izračun vrednosti NTU (Number of Transfer Units):

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}} \quad (3)$$

$$NTU = \frac{14,877 \times 5,54}{32,93}$$

$$NTU = 2,502$$

Izračun vrednosti  $C_{min}$  (toplotna kapaciteta):

$C_{min} = C_{max}$ , saj sta obe naši tekočini zrak.

$$C_{min} = C_{max} = C_{air} \times m_{air} \quad (4)$$

$$C_{min} = C_{max} = 1000 \frac{J}{kgK} \times 0,03293 \text{ kg/s}$$

$$C_{min} = C_{max} = 32,92 \text{ W/K}$$

Izračun vrednosti  $m_{air}$  (masni pretok zraka):

$$m_{air} = 150 \frac{m^3}{h} = 0,04876 \text{ kg/s}$$

$m_{air}$  je bil izračunan s pomočjo pretvornika enot na internetu Mass air-flow rate unit converter = Pretvornik enot za masni pretok zraka [12].

Izračun učinkovitosti ( $\epsilon$ ):

$$\epsilon = \frac{NTU}{1+NTU} \quad (5)$$

$$\epsilon = \frac{2,53}{1 + 2,53}$$

$$\epsilon = 0,672 \cong 67,2 \%$$

Učinkovitost sistema s PLA jedrom je okoli **67,2 %**.

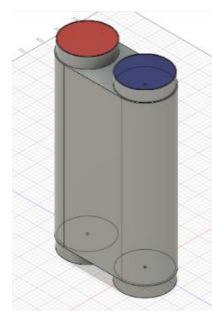
Podatki za primerjavo površine toplotnega izmenjevalca komercialnega izdelka in našega toplotnega izmenjevalca so sledeči:

Komercialni toplotni izmenjevalec (slika 15) ima mere: 250 x 250 x 250 mm (predvidevamo 30 vzporednih plošč) in površino 1,875 m<sup>2</sup>

Naš toplotni izmenjevalec (slika 16) ima mere: 500 x 290 x 130 mm in površino po izračunu v nTopology: 5,57 m<sup>2</sup>



Slika 15: Komercialni toplotni izmenjevalec (vir: internet)



Slika 16 Lastni toplotni izmenjevalec (vir: osebni arhiv)

Če bi toplotni izmenjevalec naredili iz drugačnega materiala, z višjo toplotno prevodnostjo, bi bila učinkovitost višja. Če bi uporabili TCPoly Ice 9 Flex filament, ki ima toplotno prevodnost 6 W/mK, bi bila učinkovitost 71,60 %. V kolikor bi uporabili

jeklo za toplotni izmenjevalec, ki ima toplotno prevodnost 30 W/mK, bi nam dalo skoraj enako učinkovitost, 71,61 %.

S to velikostjo izmenjevalca, iz našega materiala, težko dosežemo višjo učinkovitost, saj ima zrak previsoko termično upornost. Če želimo učinkovitost še bolj povečati, moramo ali upočasniti pretok zraka skozi izmenjevalec ali povečati celotno površino toplotnega izmenjevalca. V realnosti bo učinkovitost verjetno okoli te vrednosti, saj v izračunih nismo upoštevali zanimive geometrije Gyroidov ter »Layer linij«, ki spremenijo debelino zidov v modelu. Zaradi mreženja modela, je tudi debelina zidov nekje med 0,4 in 0,8 mm, torej je naša toleranca  $\pm 0,4$  mm, kar je blizu tolerance našega tiskalnika ( $\pm 0,1$  mm). Uporabili smo šobo 0,4 mm, saj je priporočena osnovna šoba tiskalnika, ki pride skupaj s tiskalnikom ter nam je tudi skrajšala čas 3D tiskanja.

## 2.7. Izdelava izdelka

Izdelek smo pričeli izdelovati tako, da smo dali 3D tiskati vse osnovne dele sistema, kot so: posamezni deli jedra (slika 18), ohišje za elektroniko (slika 17), ohišje za senzorje ter pokrov ohišja za elektroniko.



Slika 17: Slika ohišja z elektroniko  
(vir: osebni arhiv)



Slika 18: Slika jedra v dveh kosih (vir: osebni arhiv)

Jedro (slika 17) smo natisnili iz dveh delov, saj je velikost izdelka večja kot nam to dovoljuje velikost 3D tiskalnika. Zato smo morali obe polovici pravilno združiti in zlepiti z lepilom za plastiko ter počakati 24 ur, da se posuši do končne trdnosti. Tiskanje enega dela jedra je trajalo 4 cele dni, tiskalnik je nepretrgoma tiskal dan in noč.

## 2.8. Programiranje sistema Arduino

Programiranje smo pričeli z definiranjem ter uvažanjem knjižnic »DHT22« ter »SoftwareSerial«. Knjižnice so datoteke, ki zagotavljajo našim risbam dodatne funkcije. Nato smo definirali priključne sponke za senzorje: »DHTPIN1«, »DHTPIN2«, »MQ135PIN« in releja: »RelayPin1«, »RelayPin2«.

Po končanem definiranju priključnih sponk za senzorje ter releje, ki kontrolirajo ventilatorje, smo namestili knjižnico »SoftwareSerial«, ki je dodelila nove Rx ter Tx priključne spojke, ki so potrebne za HC-05 modul, uporabljen za Bluetooth komunikacijo. Rx ter Tx priključnih spojk nismo uporabili na Arduinoju, saj so bile že v uporabi za USB serijsko komunikacijo z računalnikom (to je kabelska povezava s katero smo programirali mikrokontroler).

Sledilo je definiranje tipa senzorja za DHT. Izbirali smo lahko med tipom DHT11 ter tipom DHT22. Mi smo se odločili za tip DHT22, saj lahko deluje pri nizkih ( $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ter visokih ( $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) temperaturah ter je bolj odziven.

Programu smo dali ukaz, naj razlikuje med dvema DHT22 senzorjema.

Nato smo definirali hitrost izvajanja funkcij za branje senzorjev, funkcijo za posodabljanja stanja ventilatorjev ter funkcijo za posodobitev kode, glede na podatke aplikacije. Definirali smo tudi privzete nastavitve programa.

Potrebno je bilo določiti tudi parametre za ročno prigrasitev samodejne kontrole sistema. Za kasnejšo obdelavo smo morali shraniti podatke (ki smo jih prejeli od aplikacije) v medpomnilniku nizov, saj nam jih je aplikacija pošiljala črko za črko.

Potem smo naredili prvo funkcijo, ki je začetna funkcija. Tam smo najprej začeli z ukazom za Serial (serijsko) ter Bluetooth komunikacijo, na frekvenci 9600 BAUD.

Modul 9600 BAUD pomeni, da se podatki prenašajo s hitrostjo 9600 simbolov na sekundo. To frekvenco smo izbrali, ker je standardna za Arduino mikrokontroler, za kontroliranje sistema.

Nato smo vtiskali ukaz za oba DHT senzorja za toploto ter vlažnost (prvi senzor je zunaj ter drugi senzor je notri). Seveda smo označili priključne spojke relejev za

OUTPUT, te torej niso sprejemale signalov, temveč so samo spreminjale napetost iz 0 V na 5 V. Potrebno je bilo nastaviti tudi napetost na priključnih spojkah, za releje na 0 V, v kolikor bi bile že prej vklopljene. Ta funkcija se vklopi samo enkrat in to je ob prižigu naprave. Nato smo vstavili še funkcijo za branje senzorjev: DHT za zunanost (hum2, temp2), DHT22 (temp1, hum1) za notranost in za branje stopnje plinov v notranosti (gasValue) ter funkcijo za predprocesiranje Bluetooth komunikacije.

Sledila je izdelava funkcije za kontroliranje ventilatorjev. Celo funkcijo smo najprej določili kot en »if« ukaz, ki nadzira delovanje funkcije za preglas in preverja ali je prižgana ali ne. Mi smo določili dva »if« ukaza za vklop in izklop ventilatorjev, glede na raven žlahtnih plinov v prostoru. V funkcijo smo dodali tudi ukaz »Serial.println« za razhroščevanje kode. Dodali smo tudi potrebno kodo in knjižnice za prikaz vrednosti spremenljivk temp2, hum2, temp1 in hum1 na OLED zaslonu. V prilogi 2 se nahaja hiperpovezava na celotno kodo sistema, ki je optimizirana za najhitrejšo odzivnost.

## 2.9. Programiranje mobilne aplikacije

Za programiranje aplikacije smo uporabili spletno orodje MIT App Inventor [13], zaradi lahke uporabe, enostavnega razumevanja in ker je brezplačen.

Programiranje aplikacije smo začeli s testiranjem HC-05 modula, za katerega smo naredili enostavno skripto, kjer smo samo priklapljali ter izklapljali rele. Slika 19 nam prikazuje enostavno skripto za vklop in izklop releja.

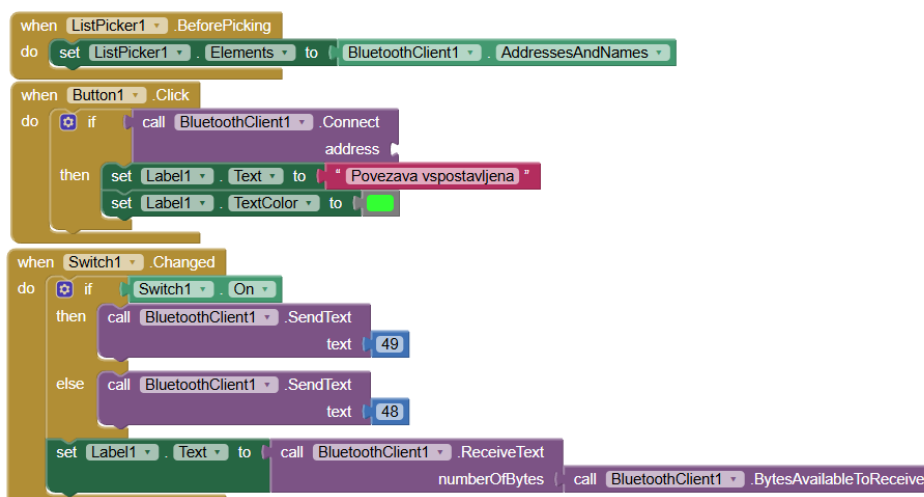
```
1 #include <SoftwareSerial.h> // uvažanje knjižnice, ki omogoča serijsko komunikacijo z digitalnim podnožkom, ki niso serijska vrata
2
3 SoftwareSerial Bluetooth(11, 10); // RX, TX
4 int ledpin=13; // rele se prižiga ter ugaša
5 int BluetoothData; // informacije ki jih prejmemo od telefona
6
7 void setup() {
8     // tukaj smo ustavili kodo ki se zažene samo enkrat
9     Bluetooth.begin(9600);
10    Bluetooth.println("Bluetooth On please press 1 or 0 blink LED ..");
11    pinMode(ledpin,OUTPUT);
12 }
13
14 void loop() {
15     // glavna koda ki se konstantno ponavlja
16     if (Bluetooth.available()){
17         BluetoothData=Bluetooth.read();
18         if (BluetoothData=='1'){ // če je stikalo prižgano
19             digitalWrite(ledpin,1);
20             Bluetooth.println("LED On D13 ON ! ");
21         }
22         if (BluetoothData=='0'){// če je stikalo ugasnjeno
23             digitalWrite(ledpin,0);
24             Bluetooth.println("LED On D13 Off ! ");
25         }
26     }
27     delay(100); // pripravi se za naslednje informacije
28 }
```

Slika 19: Enostavna skripto za vklop in izklop releja (vir: osebni arhiv)

Sledil je uvoz knjižnice za omogočanje serijske komunikacije s HC-05 modulom (linija 1) ter začeli z aktiviranjem knjižnice SoftwareSerial, ki smo ji dodelili ustrezne priključke, ki jih je uporabljala za komunikacijo s HC-05 modulom. Določili smo tudi priključek za preklapljanje releja. Prav tako smo definirali spremenljivko za informacije, ki jih prejema od telefona (linija 5). Nato smo pričeli s prvo funkcijo, ki se priklopi samo enkrat ter vzpostavi Bluetooth komunikacijo s telefonom, na frekvenci 9600 BAUD. Navedeni priključek smo konfigurirali tako, da deluje kot izhod. Naredili smo tudi funkcijo, ki se nenehno ponavlja (linija 14).

Nato smo začeli delati aplikacijo v spletnem orodju MIT App Inventor, v katerega smo najprej dodali blok ListPicker1, ki je uporabljen za izbiranje prave naprave, nato blok Button1, ki je bil uporabljen kot sprožilec za začetek Bluetooth komunikacije in blok Label1, ki je samo oznaka, da nam pove, ali smo povezani ali ne. Dodali smo tudi blok BluetoothClient1, ki je odgovoren za Bluetooth komunikacijo.

Po zaključenih blokih, smo začeli programirati aplikacijo s pomočjo dodatnih blokov. Dodali smo pogoj za začetek prve funkcije, ki se sproži, ko se izbere naprava, s katero se želimo povezati, nato se začne druga funkcija, ob pogoju, da se stisne gumb za povezavo ter nato spremeni ime ter barvo bloka Label1 na besedilo Povezava vzpostavljena. Po vzpostavljeni povezavi, smo lahko začeli uporabljati stikalo, ki je priklapljalno ter izklapljalno rele. Se pravi, ko se je spremenilo stanje stikala, je tudi aplikacija poslala ali število 1 ali število 0 (uporabili smo ASCII števila: 48 = 0, 49 = 1). Nato smo dodali ukaz za spreminjanje besedila bloka Label1, na stanje Releja, torej, če je stanje releja priklopljeno bo napisalo »LED on D13 ON« ter če je izklopljeno, bo napisalo »LED on D13 Off«. Izgled aplikacije za testiranje je vidno na sliki 20.



Slika 20: Izgled aplikacije za testiranje (vir: osebni arhiv)

Po tem, ko smo videli, da modul deluje, smo nadgradili aplikacijo, da je vključevala bloke: VericalArangement, ListPicker, Button1, Label, Switch1, Label2, TextBox1, Button2, Label3, TextBox2, Button3.

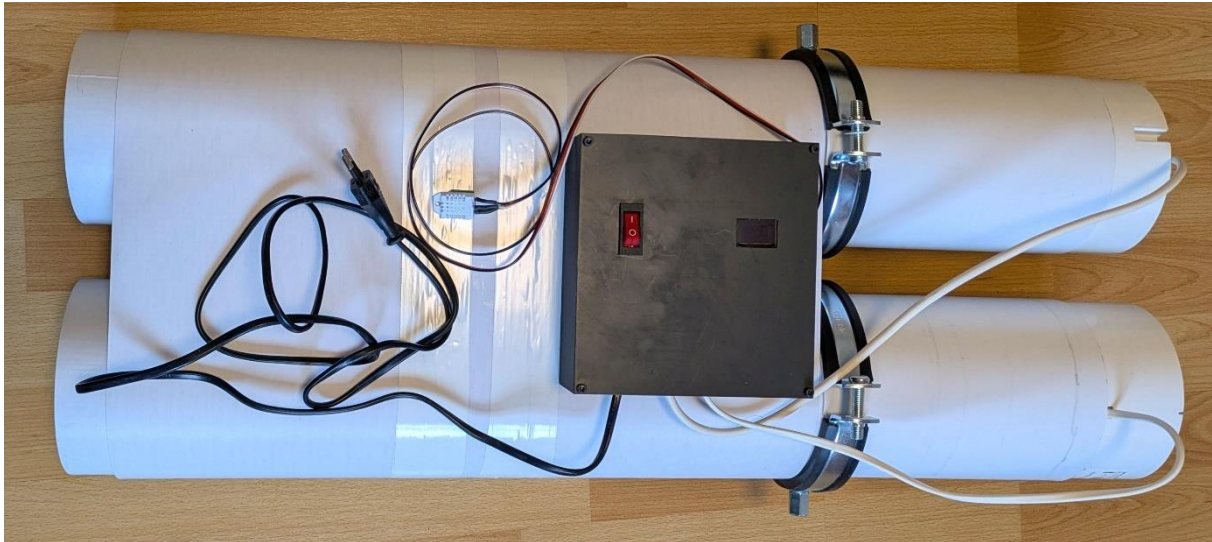
Nato smo začeli s programskim delom aplikacije, kjer smo zamenjali našo funkcijo s pošiljanjem ASCII številčk s »text« funkcijo, s katero smo pošiljali črke ter simbole. Na koncu vsakega besedila smo dodali »|«, ki signalizira konec tega besedila, v Arduino kodi. Dodali smo tudi dva bloka za spreminjanje parametrov nivoja plina v sobi (kako pogosto se vklopi sistem).

Delujoč program smo naložili na svoj računalnik in ga, kot aplikacijo, prenesli na svoj telefon preko QR kode.

Na telefonu smo zagnali aplikacijo in se tako povezali na krmilnik Arduino, naše kontrolne enote ter se tako povezali z našim doma izdelanim prezračevalnim sistemom.

### 3. REZULTATI

Z opisanim postopkom in sistemom nam je uspelo narediti centralizirani prezračevalni sistem, ki deluje ter ga lahko upravljamo preko telefona. Na sliki 21 vidimo naš končni izdelek.



*Slika 21: Končan toplotni izmenjevalec (vir: osebni arhiv)*

### **3.1. Rezultati meritev našega izdelka**

Dejanske meritve našega toplotnega izmenjevalca smo izvedli ob 8.00 zjutraj, pri zunanji temperaturi 4,9 °C in vlažnosti 47,2 %, v suhem oblačnem vremenu.

Temperatura prostora, v katerem se je nahajal naš toplotni izmenjevalec, je bila 21,1 °C in vlažnost prostora 62 %.

Zaradi napak pri 3D tiskanju, so se nam pojavila odstopanja, ki so bila dovolj velika, zato sta se začela hladen in topel zrak mešati, kar je zmanjšalo učinkovitost. Če bi želeli rešiti ta problem, bi morali sistem natisniti iz enega kosa, ki ga mi ne moremo, saj imamo fizično premajhen 3D tiskalnik.

Za našo meritev smo, zunanji vhodni in izhodni manšeti toplotnega izmenjevalca, priklopili na približno 1,5 m dolgo aluminijasto gibljivo cev, premera 125 mm ter cevi postavili tako, da je ena cev zajemala zunanji zrak, druga cev pa je oddajala notranji zrak. Na notranjo izhodno in vhodno manšeto smo namestili dva 125 mm notranja ventilatorja. Ventilator na izhodni notranji manšeti je zrak potiskal ven, ventilator na vhodni notranji manšeti je zrak potiskal noter – v prostor. Sam toplotni izmenjevalec se je nahajal v notranjem prostoru. Za test smo pustili oba ventilatorja delovati 5 min in v tem času večkrat merili temperaturo, na vhodni notranji manšeti.

Hrupa, ki ga ustvarja naprava nismo merili, vendar je v tehnični dokumentaciji ventilatorja navaden hrupa nivoja 36 dB. Za primerjavo, jakost hrupa glasnega govora je 60 dB, šepeta pa 20 dB.

Merjenje pretoka zraka, temperature in vlažnosti, ki smo ga izvedli, je prikazan na sliki 22:



*Slika 22: Merjenje pretoka, temperature in vlažnosti (vir: osebni arhiv)*

Zaradi tehničnih težav, zunanjih dovodno-izhodnih 125 mm cevi nismo mogli popolnoma ločiti od notranjega prostora, saj nismo imeli na voljo dovolj veliko luknjo za obe cevi v zunanji steni, ki bi jo nato dodatno zatesnili, da preprečimo vdor hladnega zunanega zraka, v notranji prostor. Tako smo cevi položili pri odprtih vratih na tla in jih nataknili na ustrezne manšete toplotnega izmenjevalca. Zaradi tega, se je zrak v notranjem prostoru čez čas ohladil za dve oz. tri stopinje.

Tovarniška vrednost pretoka 125 mm, notranjega ventilatorja: 100 m<sup>3</sup>/h

Izmerjena vrednost hitrosti zraka 125 m, na vhodni notranji manšeti: 1,67 m/s

Temperatura zraka po 20 s delovanja, na vhodni notranji manšeti: 15,6°C

Temperatura zraka po 2 min delovanja, na vhodni notranji manšeti: 13,9°C

Temperatura zraka po 5 min delovanja, na vhodni notranji manšeti: 12,2°C

Izračun dejanskega pretoka zraka 125 mm notranjega ventilatorja, na vhodni notranji manšeti v m<sup>3</sup>/h:

$$\Delta T = \frac{T1 + T2 + T3}{3}$$

$$\Delta T = \frac{15.6 + 13.9 + 12.2}{3}$$

$$\Delta T = 13.9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Izračun učinkovitosti 5-minutnega testa:

$$\epsilon = \Delta T \div T_{not}$$

$$\epsilon = 13.9K \div 21.1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\epsilon = 0.65 = 65 \%$$

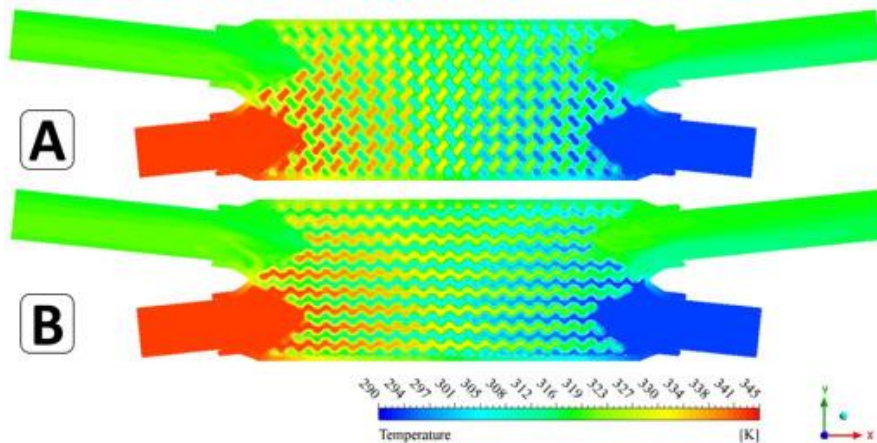
Na podlagi dobljenih rezultatov, je učinkovitost toplotnega izmenjevalca 65 %. Ker so meritve vseh toplotnih količin, zaradi tehničnih in prostorskih omejitev potekale v prostoru doma in ne v laboratorijskih pogojih ter je jedro iz dveh kosov, so vse vrednosti informativne. Vendar pa smo dokaj dobro potrdili računsko predpostavko toplotne učinkovitosti iz poglavja 2.6.

Če bi želeli natisniti jedro iz enega kosa, bi lahko uporabili 3D tiskalnik ELEGOO Neptune 3 Max, saj je ugoden glede na njegovo velikost (ob času pisanja naloge je njegova cena 339,58 €) [14].

Zaradi izjemne računske zahtevnosti CFD simulacije našega 3D modela, te nismo uspeli narediti, zato smo povzeli rezultate podobnega modela, ki smo ga našli na internetu.

Podobni model, ki smo ga našli na internetu, je bil natisnjen s SLM postopkom.

Spodnja slika prikazuje model mešanja toplote (slika 23):



Slika 23: Model mešanja toplote (vir: internet)

Glede na podatke, izmenjevalec toplote ni 100 % učinkovit, kar se vidi tudi po temperaturi vhodnega in izhodnega zraka (temperatura je podana v Kelvinih;  $273\text{ K} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Uspelo nam je narediti sistem za prezračevanje, ki ima manjšo učinkovitost kot komercialni, vendar je precej cenejši (12 % cene – samo toplotni izmenjevalec) in dimenzijsko manjši od komercialnih modelov.

#### 4. RAZPRAVA IN INTERPRETACIJA REZULTATOV

Ponudba prezračevalnih sistemov na trgu je zelo različna. Vse bolj se nagibamo k temu, da so potrebne prezračevalne naprave v novogradnjah ali starejših objektih, zaradi znižanja stroškov ogrevanja in tudi prihranka pri času, saj se v zimskem času srečujemo z onesnaženim zrakom. To je predvsem zaradi kurjenja ob različnih delih dneva, zato je zelo težko prezračiti stanovanja ali prostor, v kolikor je kakovost zraka zunaj slaba. Najboljša rešitev je kontrolirano prezračevanje, z vgrajeno prezračevalno napravo, ki vrača odpadno toploto. Prezračevalna naprava dovaja svež zrak in odvaja izrabljen zrak, preko toplotnega izmenjevalca, pri čemer se toplota prenese, a se zrak ne meša.

Skozi celotno raziskovalno nalogo smo poskušali prikazati proces izdelave lokalnega toplotnega izmenjevalca z uporabo 3D tiskalnika. Začeli smo s postopkom, od načrtovanja in konstruiranja izdelka do izdelave in preizkusa.

Ker smo želeli preveriti teorijo, da je doma narejen izdelek dovolj dober in prav tako učinkovit ter cenejši, spodaj podajamo oceno stroškov, za kontrolno enoto in sam izdelek ter poleg ustrezna primerljiva proizvoda, ki se ju trenutno da dobiti na internetu.

Strošek nakupa izdelkov, ki smo jih potrebovali za kontrolno enoto je podan v tabeli 1:

*Tabela 1: Tabela stroškov za kontrolno enoto*

Izdelek	Stran, kjer smo ga dobili	Cena
HLK-15M05C	AliExpress	3 €
Didoda1N4007	AliExpress	1,47 €
Arduino Nano V3	AliExpress	6,58 €
HC-05	AliExpress	3,66 €
Upori	Smo že imeli	0,04 €
Tranzistorji	AliExpress	1,44 €
MQ135	AliExpress	2,20 €
2xDHT22	AliExpress	3 €
Priključne spojke za Arduino	Komponentko	3 €
Kabli s konektorji	Komponentko	4 €
Rele (SRD-05VDC-SL-C)	Aliexpress	0,50 €
Podnožja za kable 3p 10 kosov	AliExpress	1,50 €
Podnožja za kable 2p 10 kosov	AliExpress	1,50 €
AC Kable	Smo že imeli	1 €
Ploščica – tiskano vezje 5 kosov	JLPCB	9 € (1,8 € za 1 kos)
BLX-A ohišje za varovalko	Aliexpress	0,50 €
0,1A steklena varovalka	AliExpress	0,45 €
Kondenzator 470uF elektrolitski 16V	AliExpress	0,34 €
0,96 inčni (64×128 mm) OLED zaslon	AliExpress	0,95 €
Skupaj:		43,95 €

*Tabela 2. Tabela stroškov uporabljenih delov*

Izdelek	Trgovina	Cena
≈ 4 kg PLA filament za 3D printer	<a href="https://www.crafrum.eu/product/crafrum-pla-hs/">https://www.crafrum.eu/product/crafrum-pla-hs/</a>	58,00 €
Ventilator 2 kosa (1 kos = 18 €)	OBI d.o.o.	36,00 €
Skupaj:		94,00 €

Skupna cena vsega (tabela 1 + tabela 2) je 137,95 € (cena ne vsebuje stroškov dostave).

Ko primerjamo našo ceno stroškov izdelave toplotnega izmenjevalca, ki je 137,95 € in ceno primerljivega komercialnega izdelka centralnega rekuperatorja VENTS VUT 100 P MINI, ki je 565,59 € z 22 % DDV (brez montaže na dan 24. 1. 2025) [6], vidimo, da je naš strošek izdelave cenejši, ob predpostavki, da že imamo na voljo 3D tiskalnik in ne upoštevamo svojega dela. Razlika je tudi v največjem pretoku zraka med njima, saj ima naš ventilator 150 m<sup>3</sup>/h, zgoraj omenjeni komercialni izdelek pa v tehnični dokumentaciji navaja največji pretok zraka 100 m<sup>3</sup>/h. Razlika med njima je tudi v materialu in uporabi filtra za zrak (naš izdelek ga nima).

Termični rekuperator, ki smo ga izdelali, je cenejši približno za 75 %, pri čemer ima naša kontrolna enota več funkcij kot primerljiva komercialna kontrolna enota HRV/ERV Actuator Assembly [15], ni pa tako učinkovit kot komercialna izvedba. Vendar pa ima naša kontrolna enota veliko možnosti različnih nadgradenj, ki se lahko izvedejo z malimi spremembami programske kode in samega vezja.

Z raziskovalno nalogo smo potrdili možnost cenovno ugodne in delujoče domače izdelave centralnega prezračevalnega sistema, s 3D natisnjnim toplotnim izmenjevalcem, ki uporablja Gyroid polnilo.

Pri tem pa moramo upoštevati, da je treba lokalni toplotni izmenjevalec zraka tudi vgraditi v prostor in imeti servisni prostor za vzdrževanje ali popravila. Pomembno je tudi mesto vgradnje, tesnjenje ob steni, možna gradbena dela ipd. Zato moramo pred samostojno izdelavo ali nakupom razmisliti, kakšno površino želimo prezračevati (velike ali male prostore, enega ali več), od tega je namreč odvisna vrsta sistema (rotacijski, križni ali ploščati) ter kakšen bo prihranek energije, kar pomeni, kolikšne so izgube izbranega toplotnega izmenjevalca. Pomembna je tudi izbira filtrov, izvajalec vzdrževanja in servisiranja sistema. Pozorni moramo biti tudi na kvaliteto izdelka, ki jo lahko preverimo npr. z branjem forumov. Preveriti moramo tudi prostorsko razpoložljivost za namestitve kanalov in drugih sistemskih komponent in ne nazadnje ali je naš izbrani sistem skladen z energetskimi standardi in predpisi.

## **5. DRUŽBENA ODGOVORNOST, TRAJNOST IN NAPREDEK**

Pri izdelavi izdelka, smo poskušali uporabiti večinoma samo 3D natisnjene dele ter dele, ki se jih da kupiti v elektro trgovinah ali v trgovinah za 3D tiskanje. Ventilatorji so splošnega tipa in so na voljo v prosti prodaji, v mnogih tehničnih trgovinah. Celoten toplotni izmenjevalec je narejen iz plastike PLA, ki je biorazgradljiva ter je pridobljena iz obnovljivih virov. PLA ostanki se lahko ponovno uporabijo ter s tem manj obremenjujejo okolje. Ventilatorji so standardne izvedbe in kupljeni v prosti prodaji ter so narejeni iz plastike, s stopnjo zaščite IP65, kar pomeni, da so odporni na vlago ter so bolj odporni na kondenzacijo ter rjavenje kot njihovi železni primerki. Menimo, da bi v primeru uvedbe vsaj enega takega sistema, v velikih hišah, blokih ter tudi v industrijskih objektih, zmanjšali potrebo po energiji (za ogrevanje) za vsaj 20 %.

## **6. ZAKLJUČEK IN SKLEPI**

Raziskovalna naloga je bila uspešna, saj nam je uspelo dokazati, da je z Gyroid polnilom možno izjemno povečati površino toplotnega izmenjevalnika, glede na standardni toplotni izmenjevalnik ter da je možno 3D natisniti centralni toplotni izmenjevalec za domačo uporabo.

Verjamemo, da bo z nižanjem cen različnih vrst 3D tiskalnikov, dejansko prišel čas, ko bomo lahko sami doma, na tak način, zmanjšali porabo energije za prezračevanje ter istočasno prišli do visoke toplotne učinkovitosti, pri majhni porabi prostora.

Izdelek ima veliko možnosti za izboljšave. Omenimo samo nekatere:

- Uporaba krmilnika ESP32 ter menjalnika logičnih ravni, za pretvorbo 5 V signalov na 3.3 V.
- Dodati WiFi povezljivost in hrambo podatkov v oblaku.
- Bluetooth povezljivost dodatnih senzorjev oz. povezljivost grozda Bluetooth naprav, preko modula NRF24I01+.
- Uporaba SMD komponente za zmanjšanja velikosti kontrolne enote.
- Dodati odtok za odtekanje kondenza.
- Dodati dodaten HEPA filter in mehanski filter.
- Možnost reguliranja hitrosti vrtenja ventilatorjev.

Klub pomanjkljivostim (jedro iz dveh delov, omejenost velikosti 3D tiskalnika ...) menimo, da je raziskovalna naloga uspešna ter bi jo lahko uporabili v domači ali masovni proizvodnji, ob določenih spremembah. Izdelek bi lahko tudi zmanjšali ter iz njega naredili model lokaliziranega prezračevalnega sistema.

## 7. VIRI IN LITERATURA

- [1] Kus K., Wójcik M., Malecha Z. in Rogala Z. (2024), Numerical and experimental investigation of the gyroid heat exchanger. Pridobljeno 08.12.2024 s spletne strani: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931024007130>
- [2] Hansen (brez datuma), Rekuperatorji z več kot 90% izrabo odpadnega zraka. Pridobljeno 02.01.2025 s spletne strani: <https://hansen.si/rekuperatorji-z-vec-kot-90-izrabo-odpadnega-zraka/>
- [3] Predstavitev 3D tiska (2019), str.7. Pridobljeno 15.01.2025 s spletne strani: [https://dijaski.net/gradivo/rif\\_ref\\_3d\\_tiskalnik\\_02](https://dijaski.net/gradivo/rif_ref_3d_tiskalnik_02)
- [4] Formlabs (brez datuma). Guide to 3D Printing Materials: Types, Applications, and Properties: Pridobljeno 03.01.2025 s spletne strani: <https://formlabs.com/eu/blog/3d-printing-materials/>
- [5] Diabatix (2024), Using TPMS Structures in Thermal Design. Pridobljeno s spletne strani 10.02.2025: <https://www.diatix.com/blog/innovating-thermal-deign-with-tpms-structures>
- [6] Jantar trade (brez datuma). Pridobljeno 24.01.2025 s spletne strani: <https://www.klima-naprave.si/shop/>
- [7] Kumar, L. (2017) TABLE 3, Representation of the Poly-lactic Acid (PLA) Physical & Thermal Properties. Pridobljeno 10.01.2025 s spletne strani [https://www.researchgate.net/figure/Representation-of-the-Poly-lactic-Acid-PLA-Physical-Thermal-Properties\\_tbl1\\_319486459](https://www.researchgate.net/figure/Representation-of-the-Poly-lactic-Acid-PLA-Physical-Thermal-Properties_tbl1_319486459)
- [8] Azurefilm (2024), PLA filamenti: Najboljši vodnik za 3D tiskanje. Pridobljeno s spletne strani 10.12.2024: <https://azurefilm.com/sl/2024/09/26/pla-filamenti-najboljsi-vodnik/>
- [9] Speciality Metals (brez datuma), Comparing the Thermal Conductivity of Different Metals. Pridobljeno 10.01.2025 s spletne strani [https://www.smetals.co.uk/comparing-the-thermal-conductivity-of-different-metals/?srsltid=AfmBOoplphwm6dl5F9yQXLc4liAAKSXv-x1xtzg3kNcgwIH\\_nqh-elR-](https://www.smetals.co.uk/comparing-the-thermal-conductivity-of-different-metals/?srsltid=AfmBOoplphwm6dl5F9yQXLc4liAAKSXv-x1xtzg3kNcgwIH_nqh-elR-)
- [10] nTopology (brez datuma), Pridobljeno 10.12.2024 s spletne strani: <https://www.ntop.com/software/products/>
- [11] Postcard Professor (2020) Heat Exchanger Example – Analysis. Pridobljeno 04.01.2025 s spletne strani: <https://www.youtube.com/watch?v=MPpPLkPVUDY>
- [12] Remak (2025), Mass air-flow rate unit converter. Pridobljeno 02.01.2025 s spletne strani: <https://www.remak.eu/en/mass-air-flow-rate-unit-converter>

[14] ELEGOO (brez datuma). Pridobljeno 10.02.2025 s spletne strani: <https://us.elegoo.com/products/elegoo-neptune-3-max-fdm-3d-printer-massive-printing-size-of-420x420x500mm>

[15] Unilux HVAC (brez datuma). Pridobljeno 03.01.2025 s spletne strani: <https://uniluxhvac.com/technician-parts/hrverv-actuator-assembly-1/>

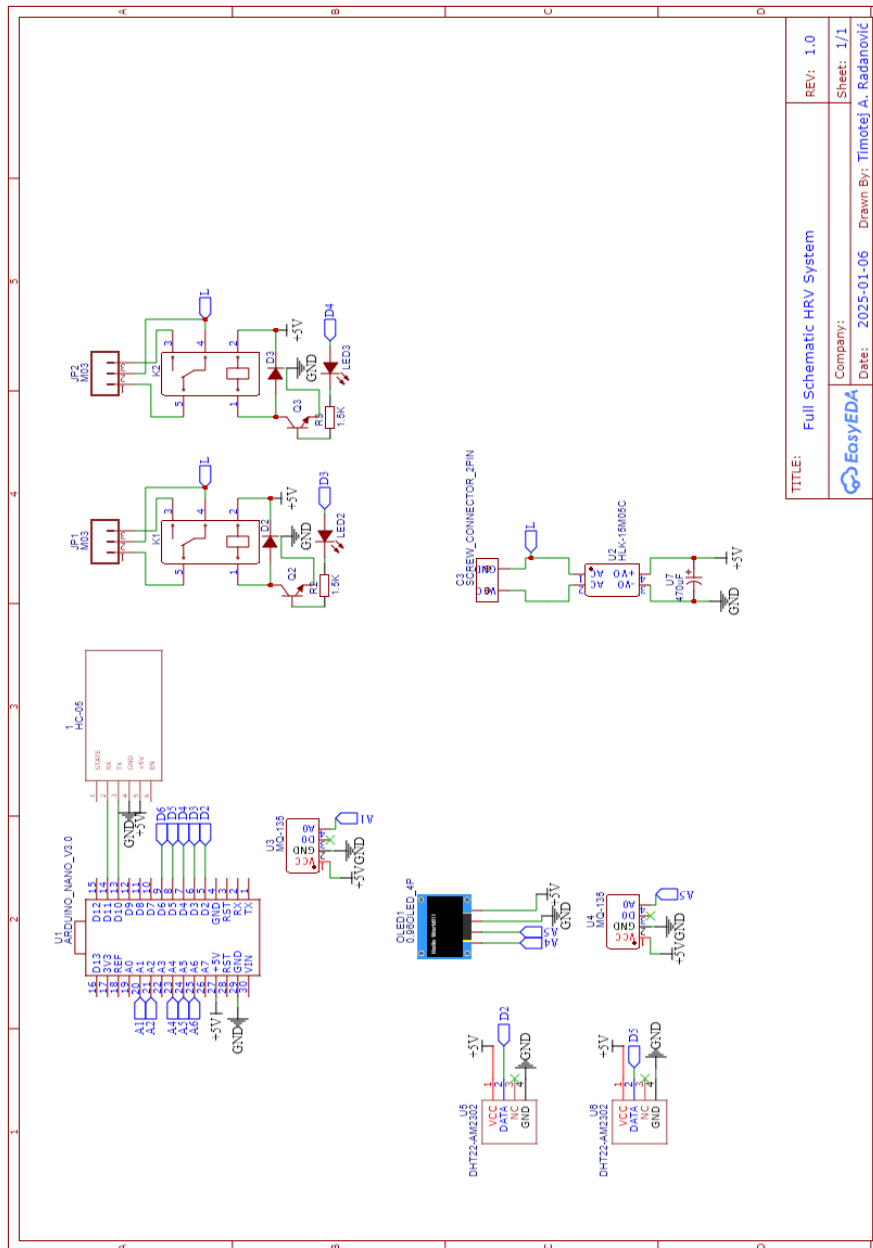
[13] MIT App Inventor (brez datuma). Pridobljeno 02.01.2025 s spletne strani: <https://appinventor.mit.edu/explore/get-started>

Viri slik:

- Slika 1 : <https://www.diabatix.com/blog/innovating-thermal-deign-with-tpms-structures>
- Slika 11: <https://www.explainthatstuff.com/how-heat-exchangers-work.html>
- Slika 14: [https://www.alibaba.com/product-detail/AHU-aluminium-price-cross-counter-flow\\_60748326775.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal\\_offer.d\\_image.6b5513a0PRYKxA](https://www.alibaba.com/product-detail/AHU-aluminium-price-cross-counter-flow_60748326775.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.6b5513a0PRYKxA)
- Slika 23: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931024007130> (slika 16. Temperature contours)

## 8. PRILOGE

### Priloga 1: Shema vezja



Slika 24: Priloga 1 – shema vezja (vir: osebni arhiv)

Priloga 2: Hiperpovezava do celotne kode in do uporabljenih modelov

<https://drive.google.com/file/d/1VwniiXWDo-nTVEb7OoMou9Pr6YxuPvJz/view?usp=sharing>