

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO
ODDELEK ZA FIZIKO
MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM 2. STOPNJE
MEDICINSKA FIZIKA

Filip Kržič

**HLAJENJE SENZORSKIH MODULOV ZA
POZITRONSKO TOMOGRAFIJO**

Magistrsko delo

MENTOR: prof. dr. Rok Pestotnik

Ljubljana, 2025

Zahvale

Hvala mentorju, prof. dr. Roku Pestotniku, za dodelitev zanimive in poučne teme, v kateri sem resnično užival, za potrpežljivost ter budno spremljanje in vodenje mojega dela, za pohvale ob uspehih ter za vse nasvete in hitre odzive pri pregledovanju pisne oblike dela. Hvala tudi za zgled kvalitetnega in toplega mentorstva.

Hvala Nadi in Jakobu za strokovno pomoč pri načrtovanju simulacij in razlagi rezultatov.

Hvala Aleksu, Mihi, Pavlu, Borisu, obema Andrejema, Roku in Danii za prijetno vzdušje v laboratoriju.

Hvala staršem, še posebej mami in očetu ☺, sestri Katji, babi Ani in ženi Klari za razumevanje, podporo, spodbude, tolažbo in neusahljivo vero v moj uspeh na študijski poti. Klari hvala tudi za požrtvovalnost pri omogočanju mojega nemotenega pisanja in popravljanja magistrskega dela.

Hlajenje senzorskih modulov za pozitronsko tomografijo

IZVLEČEK

Pozitronska emisijska tomografija (PET) je ena najpomembnejših tehnik molekularnega medicinskega slikanja. Sodobni PET detektorji so sestavljeni iz posameznih modulov, katerih ključna komponenta so senzorji svetlobe, kot je silicijeva fotopomnoževalka (SiPM). Njena učinkovitost in predvsem časovna ločljivost sta kritično odvisni od temperature, zaradi česar je hlajenje detektorskih modulov ključnega pomena. V magistrskem delu s pomočjo simulacij v programu Ansys Fluent raziščemo učinkovitost različnih hladilnih pristopov. Ovrednotimo vpliv debeline ABS pokrovov za čipe in keramike med PCB in SiPM, navpičnih električnih povezav v PCB in velikosti prostorninskih tokov pri vodnem hlajenju. S stališča položaja ozemljitvene ravnine v PCB, prisotnosti keramike med PCB in SiPM in sklopitve oz. razklopitve povezav z ozemljitveno ravnino med seboj primerjamo različne geometrije. Raziščemo tudi vpliv temperature vhodne vode. Ovrednotimo spremembe temperatur zaradi lastnega gretja SiPM in materiala plošče z vodnim tokom. Na koncu za stik modula z okoliškim zrakom predstavimo še razlike med prevajanjem in konvekcijo pri različnih vrednostih toplotne prestopnosti.

Ključne besede: pozitronska emisijska tomografija, senzorski modul, silicijeva fotopomnoževalka, hlajenje, simulacija, Ansys Fluent

Cooling of positron tomography sensor modules

ABSTRACT

Positron Emission Tomography (PET) is one of the most important molecular medical imaging techniques. Modern PET detectors are composed of individual modules, whose key component are light sensors such as the silicon photomultiplier (SiPM). Their efficiency, and especially their timing resolution, critically depend on temperature, making the cooling of detector modules essential. In this master's thesis, simulations in Ansys Fluent are used to investigate the effectiveness of different cooling approaches. The influence of the thickness of ABS chip covers and of the ceramic layer between the PCB and the SiPM, vias within the PCB, and the volumetric flow rate in water cooling are evaluated. From the perspective of the position of the ground plane in the PCB, the presence of ceramic between the PCB and the SiPM, and the coupling or decoupling of vias with the ground plane, various geometries are compared. The effect of inlet water temperature is also examined. Furthermore, the temperature changes caused by the self-heating of the SiPM and the water flow layer material are evaluated. Finally, regarding the module's contact with the surrounding air, the differences between conduction and convection at various heat transfer coefficients are presented.

Keywords: positron emission tomography, sensor module, silicon photomultiplier, cooling, simulation, Ansys Fluent

Kazalo

1	Uvod	11
2	Silicijeva fotopomnoževalka	13
2.1	Plazovna fotodioda in SPAD	13
2.2	Sestava SiPM	14
2.3	Glavne lastnosti	15
2.3.1	Signal	15
2.3.2	Izplen	15
2.3.3	Učinkovitost zaznavanja fotonov	15
2.3.4	Časovna ločljivost	18
2.3.5	Temni šum	19
2.3.6	Optični presluh	20
2.3.7	Zakasnen signal	20
2.4	Vpliv temperature na delovanje SiPM	22
2.4.1	Pragovna napetost	22
2.4.2	Izplen	22
2.4.3	CTR	23
2.4.4	Temni šum	24
2.4.5	Kompenzacija učinkov temperature	24
2.5	Lastno gretje	25
3	Osnove prenosa toplote	27
3.1	Prevajanje toplote	28
3.2	Konvekcija	28
4	Ansys Fluent	31
4.1	Metoda končnih volumnov	31
4.1.1	Preprost primer uporabe FVM	31
4.2	Prenos toplote	33
4.2.1	Anizotropna prevodnost v trdnih snoveh	34
4.3	Osnove laminarnega toka	34
4.3.1	Ohranitev mase	34
4.3.2	Ohranitev gibalne količine	35
4.4	Kratek opis reševalnika	35
5	Postopek dela	37
6	Rezultati	41
6.1	Osnovna geometrija	42
6.2	Vpliv debeline ABS pokrovov in keramike	44

6.3	Navpične električne povezave in vodno hlajenje	48
6.3.1	Primerjava geometrij	53
6.3.2	Vpliv temperature vhodne vode	57
6.4	Lastno gretje SiPM	57
6.5	Vpliv materiala plošče z vodnim tokom	61
6.6	Naravna konvekcija	63
7	Zaključek	71
8	Literatura	73

1. Uvod

Pozitronska tomografija oz. pozitronska emisijska tomografija (PET) je ena izmed najpomembnejših sodobnih tehnik molekularnega medicinskega slikanja. Omogoča prikaz presnovnih in ostalih fizioloških procesov v telesu in se najpogosteje uporablja v diagnostiki rakavih obolenj. Temelji na zaznavi anihilacijskih žarkov gama z uporabo detektorskega sistema v obliki obroča, sestavljenega iz posameznih detektorskih modulov, katerih ključna komponenta so senzorji svetlobe.

Eden izmed vedno bolj priljubljenih takšnih senzorjev je silicijeva fotopomnoževalka (ang. *silicon photomultiplier*, SiPM). Gre za polprevodniški detektor svetlobe, sestavljen iz niza vzporedno vezanih mikrocelic. Posamezna mikrocelica predstavlja zaporedno vezavo plazovne fotodiode (ang. *avalanche photodiode*, APD), ki deluje v Geigerjevem načinu (s kratico imenovane SPAD, ang. *single-photon avalanche diode*), in dušilnega upora (ang. *quenching resistor*) [1]. Silicijeve fotopomnoževalke odlikuje kompaktnost, sposobnost zaznavanja posameznih fotonov, visoka stopnja ojačanja signala ($\sim 10^6 - 10^7$) in neobčutljivost na zunanja magnetna polja.

Uporabljajo se tako v okoljih, kjer je svetlobe malo, kot tudi v močno osvetljenih okoljih. Visoki električni tokovi, ki so posledica številnih fizikalnih procesov znotraj SiPM, lahko vodijo v njeno gretje, še večjo toplotno obremenitev pa predstavlja delovanje pripadajoče elektronike v detektorskih sistemih. Ker sta učinkovitost SiPM in predvsem njena časovna ločljivost kritično odvisni od temperature, je optimalno hlajenje detektorskih modulov in sistemov ključnega pomena. Slednje predstavlja tudi bistvo raziskovalnega vprašanja te naloge – na kakšen način doseči cenovno ugodno in čim bolj učinkovito hlajenje posameznega modula in kakšne so pričakovane variacije temperature na fotonski ravnini.

Pomembno komponento pri zaznavi svetlobe pa v moduli predstavlja še scintilator – snov, ki prejeto visokoenergijsko sevanje (med drugim tudi sevanje gama) pretvori in odda v obliki fotonov ultravijolične ali vidne svetlobe.

Jedro magistrskega dela se začne z opisom silicijeve fotopomnoževalke, kjer najprej na kratko predstavimo plazovno fotodiodo in SPAD. Sledi opis sestave SiPM, njenih glavnih lastnosti, vpliva temperature na njeno delovanje in lastnega gretja. V naslednjem poglavju povzamemo osnove prenosa toplote s poudarkom na prevajanju in konvekciji. Sledi predstavitev programa Ansys Fluent, kjer opišemo metodo končnih volumnov, nekaj konceptov v zvezi z računskimi postopki, ki jih Fluent uporablja pri svojih simulacijah, in na kratko predstavimo uporabljen reševalnik. Sledi opis postopka dela in predstavitev rezultatov simulacij. V zaključku povzamemo glavne ugotovitve, predlagamo možne izboljšave ter podamo usmeritve za morebitno nadaljnje delo.

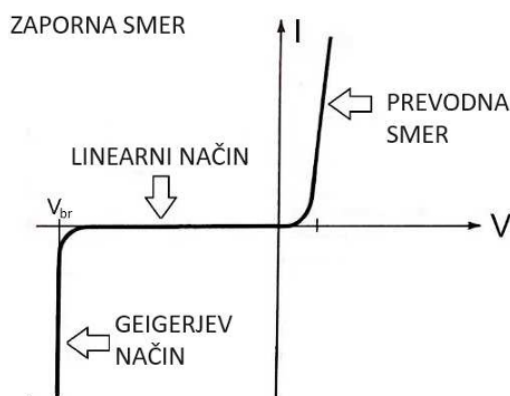
2. Silicijeva fotopomnoževalka

Kot smo omenili že v uvodu, je silicijeva fotopomnoževalka sestavljena iz niza plazovnih fotodiod oz. SPAD. Za razumevanje njenega delovanja si zato najprej oglejmo nekaj osnov le-teh.

2.1 Plazovna fotodioda in SPAD

Plazovna fotodioda in SPAD sta polprevodniška detektorja svetlobe, katerih glavna značilnost je t.i. *pomnoževanje*. Gre za proces, do katerega pride ob priključitvi dovolj visoke zaporne napetosti na p - n stik polprevodniškega detektorja. Nastalo električno polje namreč morebitni elektron v izpraznjenem območju, nastal s fotoefektom, pospešeno vleče stran od njega. Če je jakost polja dovolj visoka, da prejeta energija elektrona doseže ionizacijsko gostiteljske snovi, lahko pride do verižne reakcije – elektron ob trku ionizira enega izmed atomov, skupaj z izbitim elektronom ponovno začne pospeševati in zatem oba povzročita nadaljnje ionizacije. Iz enega začetnega elektrona tako dobimo plaz mnogih.

Stopnja pomnoževanja je odvisna od zaporne napetosti, in sicer je režim sprva linearen, ko pa presežemo mejno napetost V_{bd} , imenovano *pragovna napetost* (ang. *breakdown voltage*), se spremeni v eksponentnega (slika 2.1). Takšen način delovanja polprevodniškega detektorja imenujemo *Geigerjev način*.



Slika 2.1: Prikaz odvisnosti električnega toka od napetosti p - n stika. Ob presežku pragovne napetosti (V_{br}) v zaporni smeri detektor preide iz linearnega v Geigerjev način delovanja. Pridobljeno iz [2].

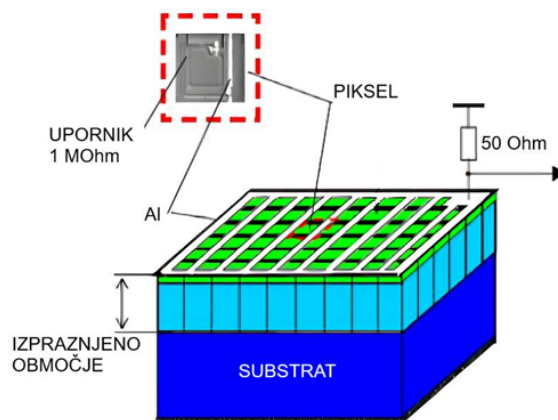
APD deluje v linearnem načinu, torej pri napetosti, nižji od V_{bd} (a vseeno blizu nje) [3]. Njen faktor pomnoževanja ali *izplen* znaša okrog 100, kar pomeni, da iz enega začetnega elektrona po procesu pomnoževanja dobimo okrog 100 končnih. To je dovolj za zaznavanje svetlobe nizke intenzitete [4], za zaznavanje posameznih fotonov pa vseeno premalo.

SPAD (single-photon avalanche diode) predstavlja nadgradnjo APD, ki lahko, kot pove že njeno ime, zaznava posamezne fotone. Deluje namreč pri napetosti, ki je od V_{bd} višja za 10-20 % [3], zaradi česar so njeni izpleni reda velikosti 10^6 .

Proces pomnoževanja se v APD ustavi, ko vsi nastali elektroni brez nadaljnjih ionizacij zapustijo detektor. V primeru SPAD pa je električno polje v napravi tako močno, da so elektroni v povprečju ionizirani hitreje, kot se izločajo iz detektorja. Plaz se lahko tako vzdržuje sam od sebe in število nosilcev naboja začne eksponentno naraščati. Ker bi v tem primeru že en sam foton povzročil zasičenje detektorja, za njim zaporedno vezemo električni upor, ki zaduši plaz elektronov in sprosti detektor – dušilni upor. Posledica samovzdržujočega-se plaz in potrebe po dušenju le-tega je, da SPAD ne more ločevati med hkratnim zadetkom enega ali več fotonov; gre torej za nekakšen binaren detektor, kjer je vsak izhodni signal enak, ali pa ga sploh ni.

2.2 Sestava SiPM

SiPM je sestavljena iz mreže vzporedno vezanih mikrocelic (v nadaljevanju *celic*) na silicijevem substratu, ki so vezane na skupen izhod. Vsaka celica predstavlja zaporedno vezavo SPAD in dušilnega upora. Dolžina njene stranice se giblje med 10 μm in 100 μm , mrežo pa sestavlja od več 100 do več 10000 celic. Med seboj so ločene s slojem kovine. Aktivna (oz. detekcijska) površina SiPM znaša od 1 mm^2 do 36 mm^2 [1]. Pod aktivnim območjem vsake celice se nahaja izpraznjeno območje pripadajočega p - n stika, kjer se plaz elektronov preko dušilnega upora oblikuje in zaduši. Na koncu je zaporedno s SiPM vezan še majhen električni upor (običajno 50 Ω ; slika 2.2), ki za potrebe odčitavanja signala pretvori električni tok v napetost [5].



Slika 2.2: Prikaz zgradbe SiPM. Zeleni kvadratici predstavljajo posamezne celice, črne črte med njimi pa ločevalni sloj kovine (Al). Znotraj črtkanega rdečega kvadrata je celica prikazana поближе, pri čemer je $\text{M}\Omega$ upor primer dušilnega upora. Pridobljeno iz [2].

Signal SiPM je vsota signalov posameznih celic. SiPM tako združujejo prednosti APD in SPAD, namreč vse dokler bo število vpadnih fotonov majhno v primerjavi s številom celic, bo izhodni signal sorazmeren s številom fotonov. Ker so SiPM sestavljene iz SPAD, bo za merljiv signal zadostoval že en foton oz. fotoelektron. V teku detekcije pa zaradi skupnega izhoda vseeno izgubimo informacijo o tem, katere izmed celic so ga zaznale.

2.3 Glavne lastnosti

2.3.1 Signal

Signal posamezne celice je sorazmeren električnemu naboju Q , zbranem med razelektritvijo celice. Slednjega lahko opišemo kot

$$Q = C \cdot (V_{bias} - V_{bd}) = C \cdot V_{ov}, \quad (2.1)$$

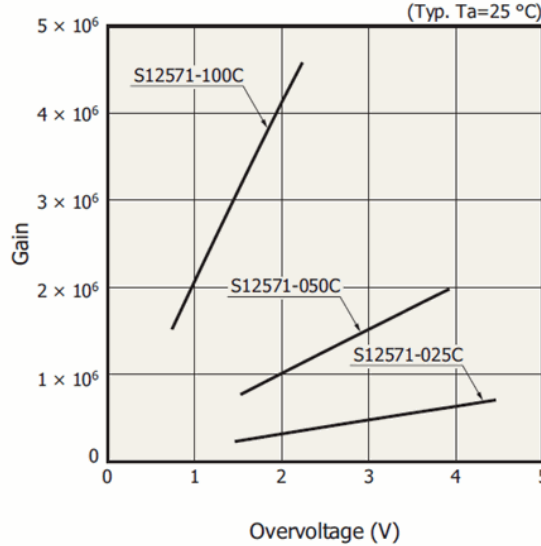
kjer je C kapaciteta posamezne celice, V_{bias} dovedena zaporna napetost in V_{bd} pragovna napetost. Razlika med slednjima, V_{ov} , predstavlja napetost nad pragom (ang. *overvoltage*) in tipično znaša nekaj voltov. Ker vse celice delujejo na isti napetosti in so razlike v kapaciteti med njimi minimalne, so oblike signalov iz različnih celic praktično enake. Prav zato lahko iz porazdelitve naboja načeloma brez težav razločimo vrhove, ki ustrezajo (različnemu) številu sproženih celic.

2.3.2 Izplen

Ker je signal celice posledica enega samega fotoelektrona, se izplen G (ang. *gain*) lahko določi kot

$$G = \frac{N \cdot Q}{q_0} = \frac{N \cdot C \cdot V_{ov}}{q_0} \sim 10^6 - 10^7, \quad (2.2)$$

kjer je N število sproženih celic, Q električni naboj, zbran med razelektritvijo posamezne celice, q_0 pa vrednost osnovnega naboja. Vidimo, da je zveza med izplenom in V_{ov} linearna, kar potrjuje tudi slika 2.3.



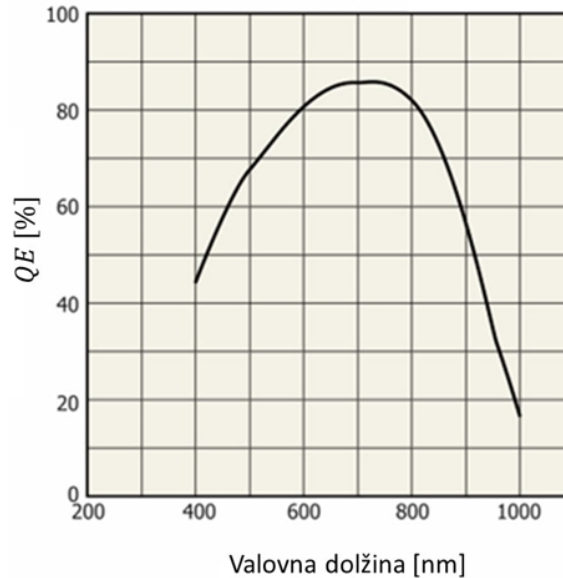
Slika 2.3: Prikaz odvisnosti izplena od V_{ov} za tri SiPM proizvajalca Hamamatsu pri tipični temperaturi okolice 25 °C. Vidimo, da je odvisnost linearna. Pridobljeno iz [1].

2.3.3 Učinkovitost zaznavanja fotonov

Učinkovitost zaznavanja fotonov (ang. *photon detection efficiency*, PDE) je verjetnost, da SiPM proizvede izhodni signal kot odgovor na vpadni foton. V praksi gre torej za razmerje med številom fotonov, ki priletijo na njeno aktivno površino, in številom fotonov, ki sprožijo elektronski plaz. Odvisna je od treh parametrov, in

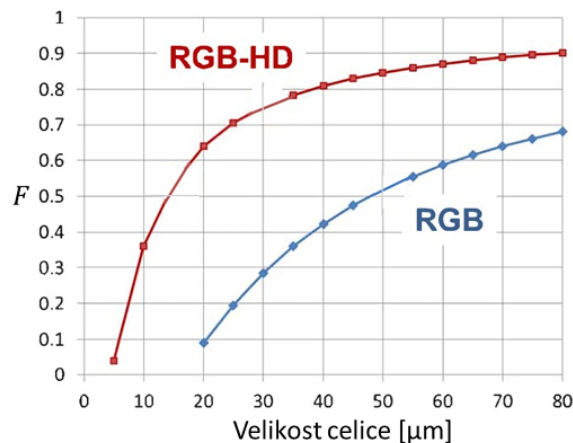
sicer kvantne učinkovitosti QE (ang. *quantum efficiency*), zapolnitvenega razmerja FF (ang. *fill factor*) in verjetnosti za sprožitev plaz P_G .

Kvantna učinkovitost nam pove verjetnost, da na aktivno površino vpadli foton povzroči nastanek nosilca naboja (torej elektrona ali vrzeli) v izpraznjenem območju. Definirana je kot povprečno število nastalih parov elektron-vrzel na vpadni foton in tipično znaša med 50 % in 80 % [6]. Odvisna je od fotonskega absorpcijskega koeficienta, ki je nadalje odvisen od valovne dolžine. Slika 2.4 prikazuje to odvisnost.



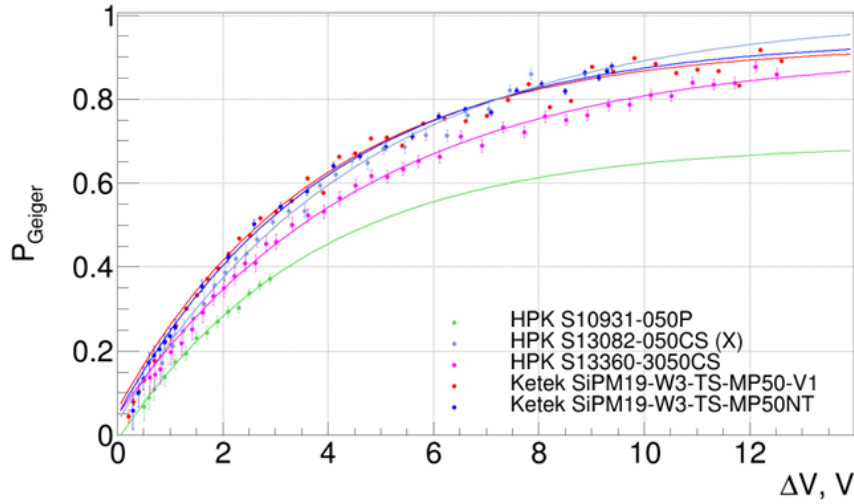
Slika 2.4: Prikaz odvisnosti QE od valovne dolžine vpadne svetlobe za SiPM proizvajalca Hamamatsu. Pridobljeno iz [7].

Zapolnitveno razmerje je razmerje med aktivno površino in celotno površino detektorja. Vedno je manjše od ena, saj določen delež površine zavzame elektronika in sklopitve med posameznimi celicami. Običajno znaša okrog 50 % [8], giblje pa se med 30 % in 80 % [1]. Izboljšamo ga lahko z izbiro majhnega števila celic večjih površin, saj bodo ob nespremenjeni velikosti elektronike in sklopitev te predstavljale večji delež celotne površine (slika 2.5).



Slika 2.5: Prikaz odvisnosti FF (na sliki označenega zgolj s F) od velikosti celice za dve SiPM proizvajalca FBK. Pridobljeno iz [7].

Verjetnost za sprožitev plazju je odvisna od treh dejavnikov, in sicer jakosti električnega polja (ki je odvisna od in se povečuje z V_{ov}), širine izpraznjenega območja (ki je prav tako odvisna od in se povečuje z V_{ov}) in položaja v detektorju, kjer vpadni foton povzroči fotoefekt. Navadno se giblje nad 60 % [8]. Prikaz njene odvisnosti od V_{ov} je na sliki 2.6.

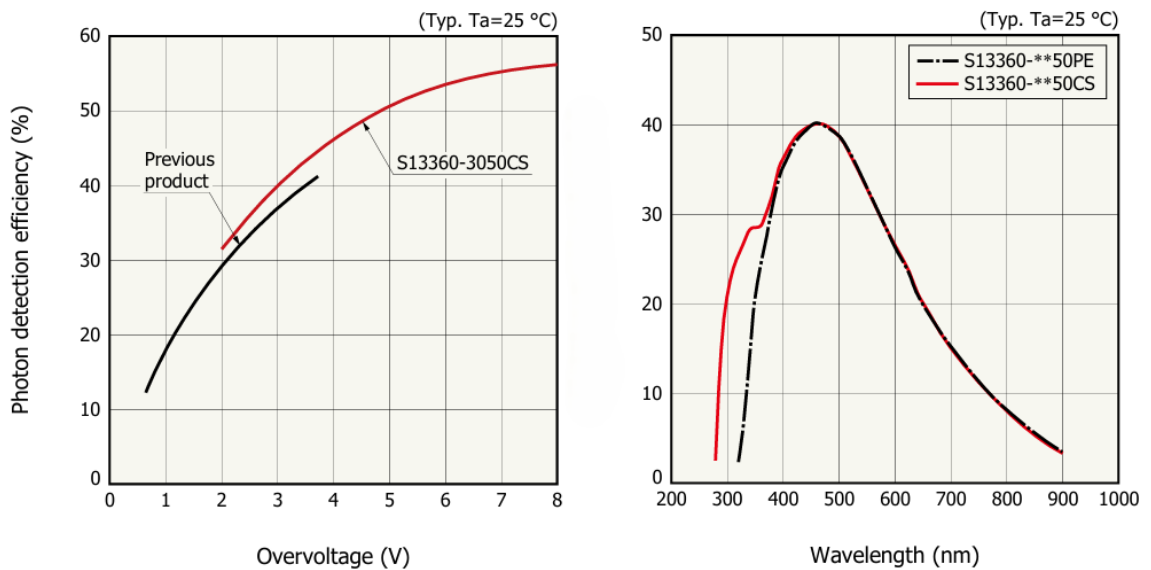


Slika 2.6: Prikaz odvisnosti P_G od V_{ov} za različne SiPM. Pridobljeno iz [9].

Učinkovitost zaznavanja fotonov se tako izračuna kot

$$PDE = QE \cdot FF \cdot P_G. \quad (2.3)$$

Njena odvisnost od V_{ov} in valovne dolžine je prikazana na sliki 2.7. PDE lahko razen z izbiro V_{ov} in valovne dolžine izboljšamo tudi z nanosom za svetlobo protiodbojne prevleke (narejene npr. iz kremenčevega stekla, SiO_2) na površino SiPM, ki poskrbi, da čimveč fotonov doseže aktivno površino detektorja [4].



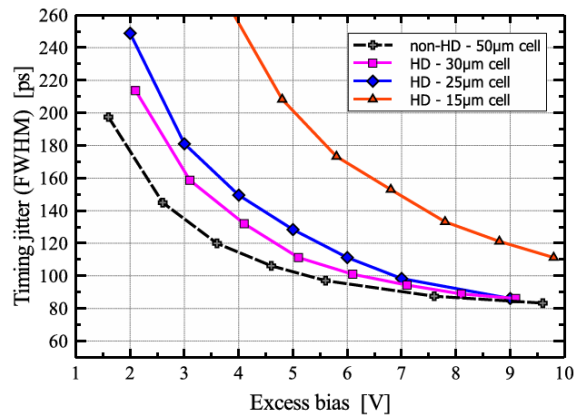
Slika 2.7: Prikaz odvisnosti PDE od V_{ov} (levo) in valovne dolžine vpadne svetlobe (desno) za dve SiPM proizvajalca Hamamatsu pri tipični temperaturi okolice 25 °C. Prilagojeno po [10].

2.3.4 Časovna ločljivost

Ena izmed najpomembnejših lastnosti SiPM je njena časovna ločljivost, imenovana tudi časovna ločljivost zaznavanja posameznih fotonov (ang. *single-photon time resolution*, SPTR). Definirana je kot FWHM porazdelitve časovnih razlik med prihodom fotona na SiPM in njegovo zaznavo s strani bralne elektronike [11]. Gre torej za mero, kako natančno lahko SiPM določi čas zaznave posameznega fotona. Običajno je njena vrednost podana v pikosekundah (ps).

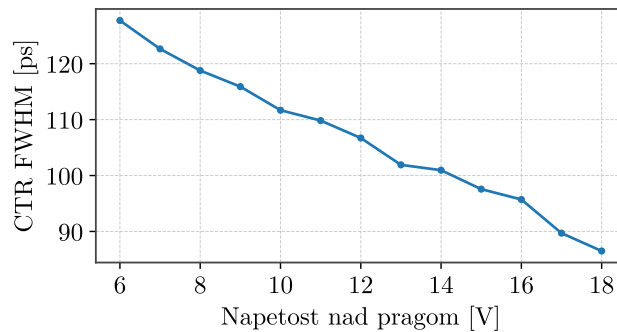
SPTR je predvsem pomemben za aplikacije, ki zahtevajo natančne meritve časa preleta, kot so PET oz. TOF-PET (ang. *time-of-flight* PET), poskusi v fiziki osnovnih delcev, LIDAR (ang. *Light Detection and Ranging*) in ostali poskusi, kjer je čas zaznavanja fotonov ključnega pomena za razlikovanje med dogodki, ki so med seboj tesno povezani.

Tudi SPTR je odvisen od V_{ov} , kot prikazuje slika 2.8, in sicer se z naraščajočo V_{ov} izboljšuje.



Slika 2.8: Prikaz odvisnosti SPTR od V_{ov} za SiPM s celicami različnih velikosti. Vidimo, da se s povečevanjem velikosti celice časovna ločljivost izboljšuje. Pridobljeno iz [12].

Za PET in TOF-PET še pomembnejša metrika pa je t.i. koincidenčna časovna ločljivost (ang. *coincidence time resolution*, CTR). Definirana je kot FWHM porazdelitve časovnih razlik med detekcijami fotonov, ki izhajajo iz istega anihilacijskega dogodka. Tako kot SPTR, se tudi CTR z naraščajočo V_{ov} izboljšuje (slika 2.9).

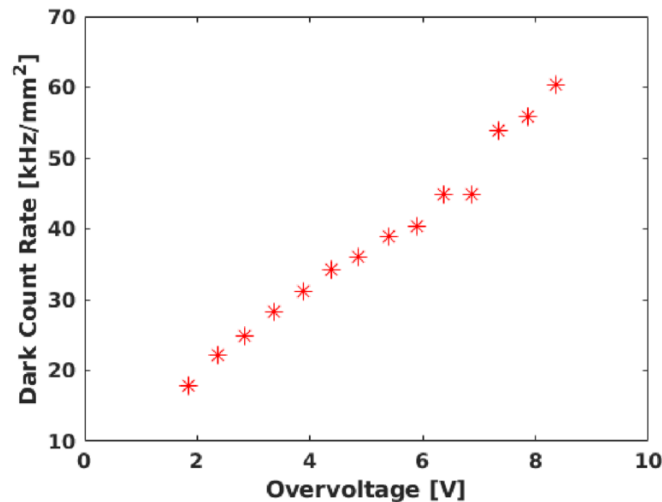


Slika 2.9: Prikaz odvisnosti CTR od V_{ov} za SiPM, uporabljen v projektu PETVision [13].

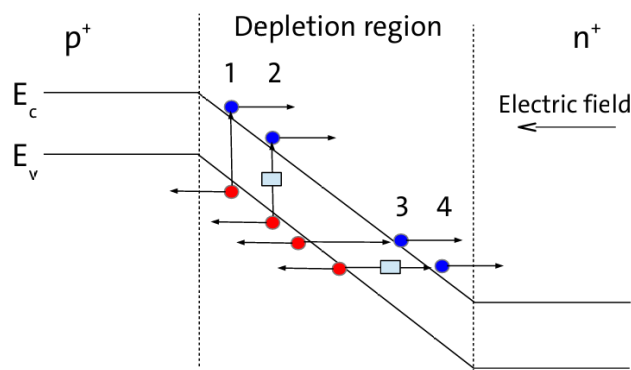
2.3.5 Temni šum

Nastanek elektronskega plazmu lahko poleg fotoelektrona povzročijo tudi termično vzbujeni elektroni in elektroni, ki preidejo v prevodni pas preko učinka tuneliranja [4, 14]. Signal takšnega plazmu je identičen signalu fotoelektrona in v procesu zaznavanja svetlobe deluje kot šum. Ker lahko nastane tudi v popolni temi, mu pravimo *temni šum*, pripadajočemu električnemu toku pa *temni tok*. Navadno je podan v obliki povprečne pogostosti na enoto površine (kHz/mm^2) in označen z DCR (ang. *dark count rate*). Največjo težavo predstavlja v okoljih, kjer je vpadne svetlobe malo, navadno pa se njegova vrednost giblje pod $1 \text{ MHz}/\text{mm}^2$ [4].

Ker se verjetnost za sprožitev plazmu povečuje z naraščajočo V_{ov} , se posledično tudi DCR povečuje z naraščajočo V_{ov} (slika 2.10). Na temni šum pa posredno vpliva tudi fundamentalni gradnik SiPM in polprevodniških detektorjev nasploh, in sicer p - n stik. Zaradi dodatnih energijskih nivojev, ki kot posledica nečistoč nastanejo znotraj energijske reže, tudi »nefotonsko«
ustvarjeni elektroni lažje premagajo pregrado, ki jih ločuje od prevodnega pasu (slika 2.11).



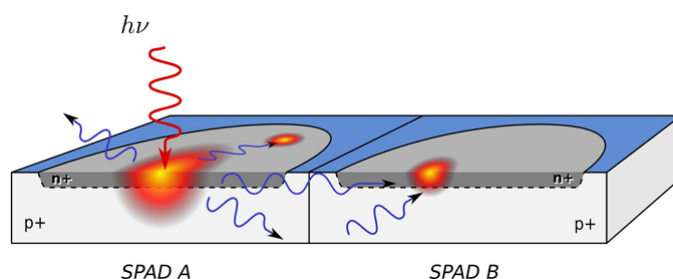
Slika 2.10: Prikaz odvisnosti DCR od V_{ov} . Pridobljeno iz [15].



Slika 2.11: Prikaz procesov, ki povzročajo temni šum. 1: Neposreden prehod v prevodni pas zaradi termične vzbuditev. 2: Termična vzbuditev preko dodatnega energijskega nivoja zaradi nečistoč. 3: Neposreden prehod v prevodni pas s tuneliranjem. 4: Prehod s tuneliranjem preko dodatnega energijskega nivoja zaradi nečistoč. Pridobljeno iz [4].

2.3.6 Optični presluh

Fotoni lahko posamezno celico SiPM dosežejo preko obsevanja s svetlobo, lahko pa v njej tudi nastanejo kot posledica zavornega sevanja plazovnih elektronov ali sevalne rekombinacije elektronov in vrzeli [16, 17]. Meritve za silicij kažejo na $2,9 \cdot 10^{-5}$ nastalih fotonov z energijo, višjo od energijske reže Si, na plazovni elektron [18]. To pomeni, da pri izplenu velikosti 10^6 dobimo 29 fotonov, ki so sposobni ustvariti nove plazove. Ti fotoni nadalje bodisi zapustijo detektor brez povzročitve plaz u ali ustvarijo plaz v prvotni celici, bodisi pripotujejo v eno izmed sosednjih celic in tam sprožijo plaz (slika 2.12). Zadnjemu pojavu pravimo *optični presluh* (ang. *optical crosstalk*). Težaven je zaradi dejstva, da prispeva k povišanemu signalu zaradi navidezne zaznave več fotonov, čeprav je detektor v resnici zadel en sam zunanji foton.

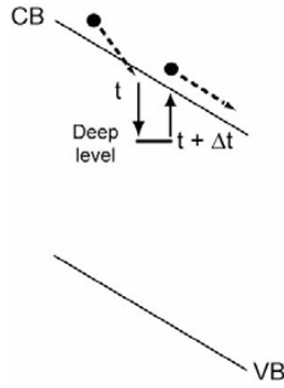


Slika 2.12: Prikaz možnih reakcij nastalega fotona in mehanizma optičnega presluha. Nastali foton lahko v aktivno območje sosednje celice pripotuje neposredno, lahko pa tudi preko odboja od zadnje strani detektorja. Pridobljeno iz [19].

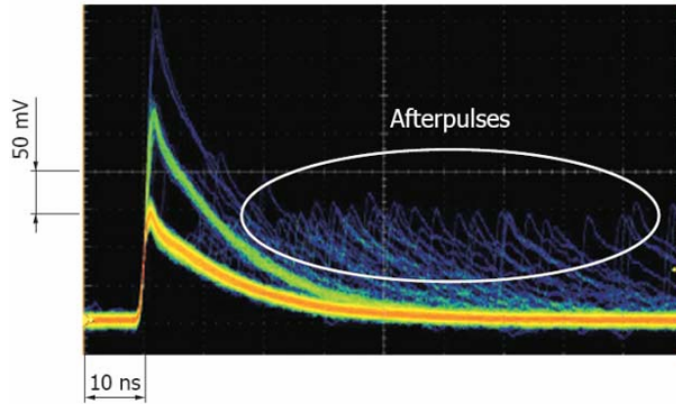
Iz gornje razlage sledi, da je verjetnost za optični presluh sorazmerna izplenu in verjetnosti za nastanek plaz u, ki sta obe odvisni od V_{ov} . Naravni način za zmanjšanje njegove verjetnosti bi bil torej znižati vrednost V_{ov} , a s tem bi seveda tudi poslabšali obe prej omenjeni lastnosti in posledično PDE. V praksi se optični presluh omejuje mehansko, in sicer se med celice doda majhne kanale, napolnjene z neprozornim materialom. Ti z odbojem ali absorpcijo preprečijo (neposreden) prehod fotonov iz ene celice v drugo, res pa je, da se na ta način malce zmanjša delež aktivne površine detektorja.

2.3.7 Zakasnen signal

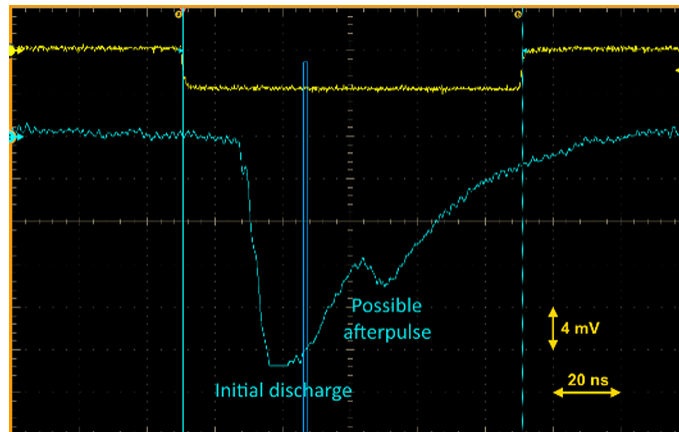
Zaradi prisotnosti nečistoč in s tem dodatnih energijskih nivojev znotraj energijske reže se lahko nosilci naboja med plazom ujamejo v enega izmed teh nivojev. Po določenem času, ko prejmejo dovolj energije za preskok v prevodni pas, se nato sprostijo in lahko ustvarijo nov plaz, ki se v obliki signala pojavi s časovno zakasnitvijo (sliki 2.13 in 2.14). V nasprotju z optičnim presluhom, kjer je dodatna amplituda signala vedno večkratnik enotske (torej tiste, ki nastane kot posledica enega fotona), ima zakasnen signal spreminjajočo-se amplitudo. Namreč, če do njega pride pred popolno izpraznitvijo celice, dodatna amplituda ne bo večkratnik enotske, pogosto pa bo njegov vrh tudi zgolj pripet na prvotni signal (slika 2.15); posledično se lahko take signale iz podatkov odstrani s pomočjo tehnik, kot je analiza višine pulzov. Če pa zakasnen signal nastane po popolni izpraznitvi celice, bo imel tako amplitudo kot obliko enako enotskemu signalu in ga od pravega ne bo mogoče razločiti [10].



Slika 2.13: Prikaz mehanizma nastanka zakasnjene signala z začasnim ujetjem elektrona v enega izmed dodatnih energijskih nivojev (označenega kot *Deep level*). VB pomeni valenčni pas, CB pa prevodni pas. Pridobljeno iz [20].



Slika 2.14: Prikaz signala z osciloscopa, kjer so vidni sunki zakasnjene signala (*afterpulses*). Pridobljeno iz [10].



Slika 2.15: Prikaz signala z osciloscopa, kjer prvotnemu signalu sledi signal z nižano amplitudo. Zaradi tega in dejstva, da je drugotni vrh pripet na originalno obliko signala, sumimo, da gre za signal plazmo pred popolno izpraznitvijo celice. Pridobljeno iz [21].

Verjetnost za zakasnen signal lahko zmanjšamo z znižanjem V_{ov} , saj tako zmanjšamo verjetnost za nastanek plazmo in število prostih nosilcev naboja (izplen), ki se

lahko ujamejo na dodatne energijske nivoje. Seveda pa tako znižamo tudi PDE.

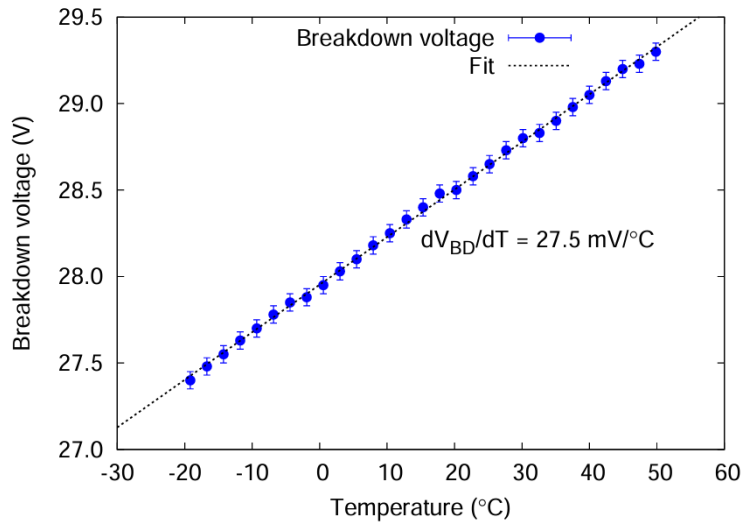
2.4 Vpliv temperature na delovanje SiPM

Eden izmed zelo pomembnih dejavnikov, ki vpliva na lastnosti in s tem tudi na delovanje SiPM in ga do sedaj še nismo obravnavali, je temperatura. Oglejmo si njene učinke.

2.4.1 Pragovna napetost

Morda najpomembnejši je vpliv temperature na pragovno napetost. Z njenim naraščanjem se namreč povečujejo vibracije atomov kristalne rešetke polprevodnika, zaradi česar nosilci naboja med svojim potovanjem izgubijo več energije s sipanjem na kristalni mreži preko oddajanja fononov [4]. To ustvari potrebo po močnejšem električnem polju, ki bo izgubam navkljub delce dovolj pospešilo za ioniziranje atomov in povzročitev (dovolj številčnega) plazmu. Preprosteje povedano, višja temperatura zahteva višjo zaporno napetost kot kompenzacijo zvišanja pragovne napetosti.

Kar se tiče konkretne odvisnosti, različne raziskave za temperaturno območje od približno $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ kažejo na linearno zvezo [9, 22, 23] (slika 2.16). Vrednosti koeficientov znašajo od približno $20\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ do $54\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ v [22], $30\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ v [24] in $27,5\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ v [23], kar so vse nezanemarljive vrednosti.



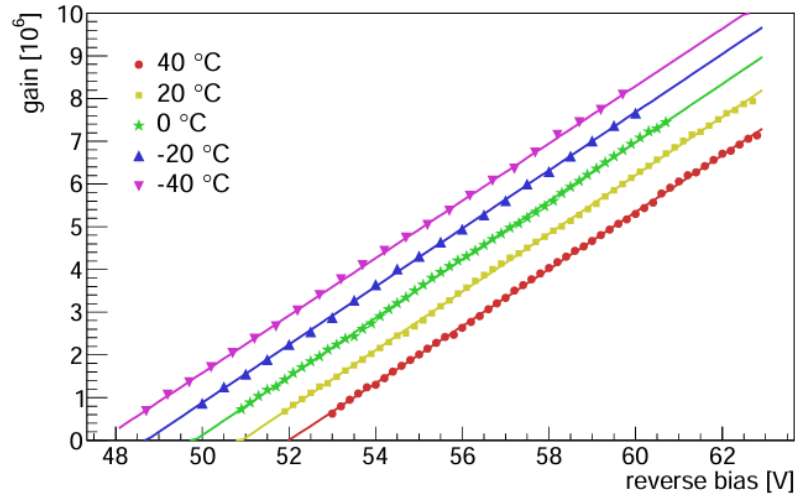
Slika 2.16: Prikaz odvisnosti pragovne napetosti od temperature za SiPM FBK RGB velikosti $1 \times 1\text{ mm}^2$ s pripadajočim temperaturnim koeficientom. Pridobljeno iz [23].

Iz zgoraj povedanega sledi, da bo pri konstantni zaporni napetosti sprememba temperature vodila v spremembo V_{ov} , za katero smo v razdelku 2.3 ugotovili, da močno vpliva na vse glavne lastnosti SiPM. Temperatura je tako očitno ključni dejavnik na vseh ravneh delovanja SiPM. Njen vpliv je še izrazitejši v primerih, ko upravljamo z večjim številom SiPM naenkrat, saj moramo tako poskrbeti za usklajeno in poenoteno delovanje celotnega nabora detektorjev.

2.4.2 Izplen

S temperaturo je posredno povezan tudi izplen. Po enačbi (2.2) se bo namreč pri konstantni V_{bias} z višanjem temperature in posledično višanjem V_{bd} izplen zniževal.

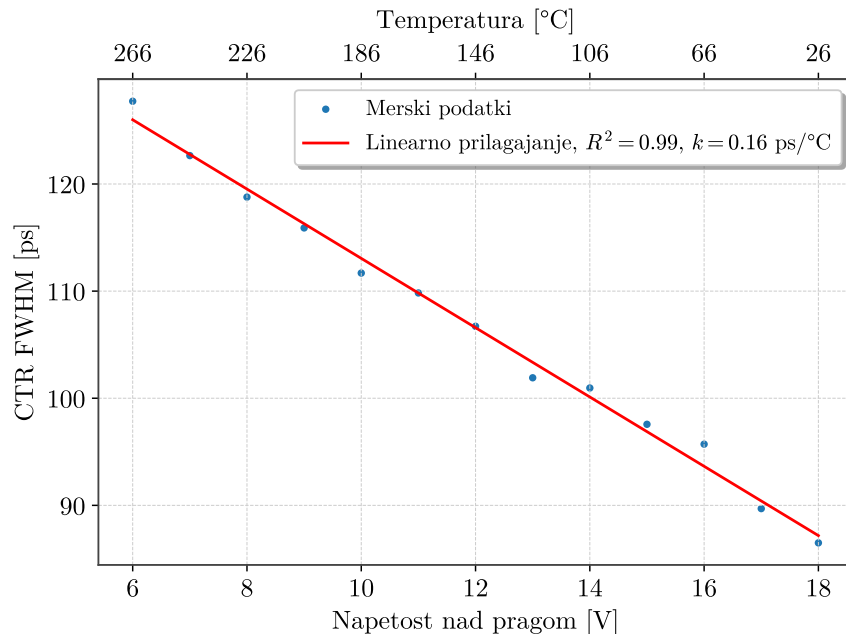
val, saj se bo nižala vrednost V_{ov} . Povedano drugače, za ohranjanje enakega nivoja izplena moramo z višanjem temperature zviševati tudi V_{bias} , kar potrjuje slika 2.17.



Slika 2.17: Prikaz odvisnosti izplena od V_{bias} pri različnih temperaturah. Vidimo, da se z višanjem temperature krivulje pomikajo proti višjim vrednostim V_{bias} . Pridobljeno iz [22].

2.4.3 CTR

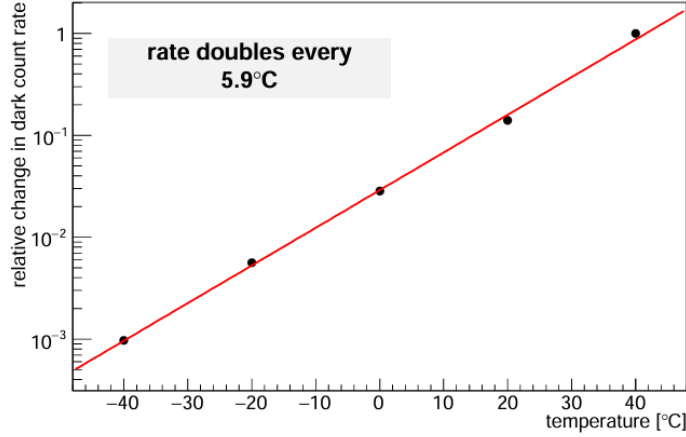
Povezava med časovno ločljivostjo in temperaturo je prav tako posredna. Ker se CTR z višanjem V_{ov} izboljšuje, se bo pri konstantni vrednosti V_{bias} z višanjem temperature in posledično višanjem V_{bd} časovna ločljivost slabšala (slika 2.18).



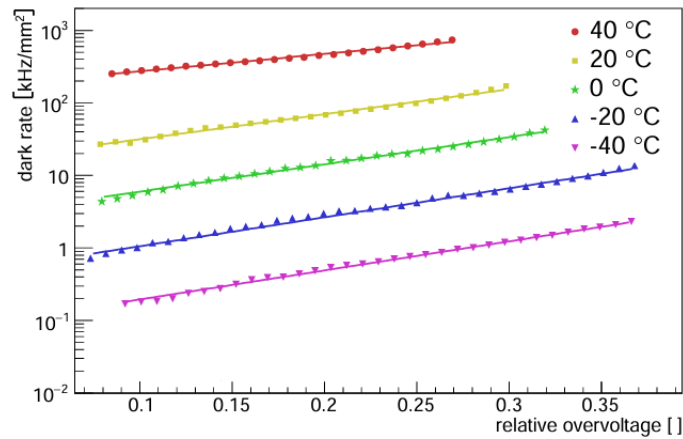
Slika 2.18: Prikaz odvisnosti CTR od V_{ov} in temperature za SiPM, uporabljen v projektu PETVision. Za določitev temperaturne skale smo predpostavili linearno spreminjanje V_{bd} s temperaturo v velikosti 50 mV/°C. Dodano je še prilagajanje pre-mice merskim podatkom skupaj z vrednostjo R^2 kot merilom kvalitete prilagajanja in pripadajočim koeficientom spreminjanja CTR s temperaturo.

2.4.4 Temni šum

Sliki 2.19 in 2.20 prikazujeta vpliv temperature na DCR. Na drugi je odvisnost sicer prikazana posredno, a je zaključek vseeno poveden – pri enaki vrednosti V_{ov} bo velikost DCR s temperaturo naraščala.



Slika 2.19: Prikaz relativne spremembe DCR od temperature za SiPM SensL J-series 30035 s pripadajočo temperaturo stopnjo podvojitve. Pridobljeno iz [22].



Slika 2.20: Prikaz odvisnosti DCR od relativne vrednosti V_{ov} za SiPM SensL J-series 30035 pri različnih temperaturah. Vidimo, da bo pri enaki vrednosti V_{ov} velikost DCR s temperaturo naraščala. Prilagojeno po [22].

Temperaturna stopnja podvojitve se od SiPM do SiPM oz. od vira do vira spreminja. [22] za tri obravnavane SiPM navaja podvojitev DCR na vsakih 5,3 °C, 5,9 °C in 7 °C, [10] pa šele na vsakih 10 °C. [4] navaja, da je dobra splošna ocena podvojitev DCR na vsakih 8 °C. Ob upoštevanju te ocene bi se z ozirom na sliko 2.18 časovna ločljivost z vsako podvojitvijo DCR poslabšala za približno 1,3 ps.

2.4.5 Kompenzacija učinkov temperature

Obstaja več načinov za kompenzacijo učinkov temperature. V grobem jih lahko razdelimo v dve kategoriji, in sicer kompenzacijo z uravnavanjem V_{bias} , ki temelji na kalibracijskih krivuljah ali sprotih meritvah temperature oz. DCR, in kompenzacijo z neposrednim uravnavanjem temperature s hlajenjem. Velika prednost metod slednje je, da lahko poleg homogenizacije s svojim vplivom na temperaturo tudi skrbijo

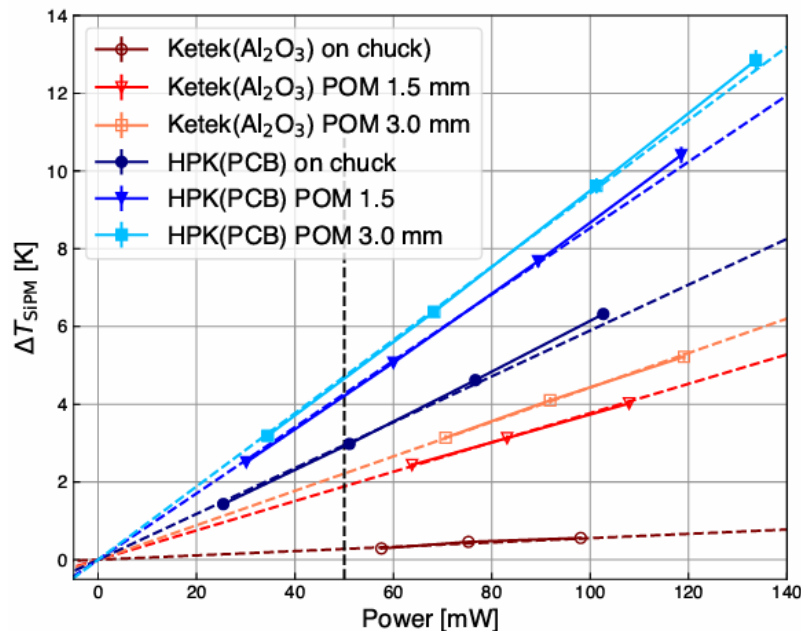
za optimalno raven relevantnih parametrov SiPM in delovanje celotnega detektorja nasploh.

2.5 Lastno gretje

Na spreminjanje temperature SiPM v glavnem najbolj vpliva oddajanje toplote s strani pripadajoče elektronike v detektorskih sistemih. V nekaterih primerih pa tudi fotopomnoževalka sama proizvede nezanemarljivo količino toplote, ki lahko vodi v dvig njene temperature in s tem v spremembo parametrov, obravnavanih v prejšnjem razdelku. Temu pojavu pravimo *lastno gretje* (ang. *self-heating*).

Razlog zanj so visoki električni tokovi znotraj SiPM kot posledica skokovitega povečanja DCR, ki lahko preseže celo 4 GHz/mm² [25]. Do tega navadno pride iz dveh razlogov. Prvi je delovanje SiPM v okoljih, kjer je prisotne veliko okoliške svetlobe (npr. sistemi LIDAR), drugi pa delovanje v sevalno močno obremenjenih okoljih, kot so npr. Veliki hadronski trkalnik in ostali trkalni eksperimenti [25, 26]. Raziskave namreč kažejo, da se sevalne poškodbe SiPM izražajo predvsem v povišanju stopnje temnega šuma [25, 26]. Količina proizvedene toplote zlahka preseže 50 mW, v ekstremnih primerih pa lahko znaša tudi nekaj 100 mW [25].

Slika 2.21 prikazuje spremembo temperature SiPM v odvisnosti od proizvedene toplote za različne eksperimentalne postavitev in pakiranja z vidika prevajanja toplote. Vidimo, da spremembe temperature presežejo tudi 10 °C, kar nikakor ni zanemarljivo (DCR bi se npr. v tem primeru najmanj podvojil, V_{bd} bi se lahko zvišala za več kot 0,5 V in časovna ločljivost v skladu s sliko 2.18 poslabšala za dobri dve ps). Poleg tega je močno opazen tudi vpliv sposobnosti prevajanja toplote glede na postavitev, saj imajo vrednosti ΔT_{SiPM} pri dani moči relativno širok razpon.



Slika 2.21: Prikaz odvisnosti spremembe temperature SiPM od proizvedene toplote za različne SiPM in različne eksperimentalne postavitve in pakiranja. Pridobljeno iz [26].

Lastno gretje SiPM je tako še eden izmed argumentov, ki govori v prid izbire hlajenja detektorskih sistemov kot odgovora na temperaturne spremembe.

3. Osnove prenosa toplote

V zadnjih dveh razdelkih oz. podrazdelkih smo poudarjali pomen hlajenja za optimalno delovanje detektorjev svetlobe. Oglejmo si nekaj njegovih fizikalnih osnov.

Če med seboj staknemo dve telesi z različnima temperaturama, se bosta leti začeli spreminjati. Toplejšemu telesu bo temperatura začela padati, medtem ko bo hladnejšemu začela rasti. Proces bo trajal toliko časa, dokler se ne bosta obe temperaturi izenačili – temu stanju pravimo *toplotno ravnovesje*.

Energijo, ki v teku izenačevanja temperatur prehaja med telesoma, imenujemo *toplota*, samemu procesu pa *prenos toplote*. Navadno jo označujemo s simbolom Q in izražamo v enoti *joule* (J). Mikroskopsko je toplota povezana z gibanjem gradnikov snovi, vedno pa prehaja s toplejšega telesa na hladnejše telo. Ne moremo je meriti neposredno, ampak zgolj posredno preko temperaturnih sprememb, ki jih povzroča.

Ko nekemu sistemu dovedemo toploto Q , se njegova temperatura praviloma poveča. Če v procesu ne pride do faznih sprememb, velja sorazmernost

$$Q = C \cdot \Delta T, \quad (3.1)$$

kjer je C t.i. *toplotna kapaciteta* z enoto J/K, ΔT pa sprememba temperature sistema. V primeru, da gre za homogeno snov, lahko toplotno kapaciteto izrazimo kot

$$C = m \cdot c \quad (3.2)$$

in sorazmernost prepišemo v

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T, \quad (3.3)$$

kjer je m masa snovi, c pa t.i. *specifična toplota* z enoto J/kg·K. Slednja nam pove, koliko toplote moramo dovesti kilogramu dane snovi, da ga segrejemo za 1 °C.

Specifična toplota je odvisna od pogojev, pri katerih jo merimo. Pri trdnih snoveh in kapljevinah navadno merimo specifično toploto pri stalnem tlaku c_p , pri plinih pa tudi specifično toploto pri stalni prostornini c_V . Tabela 3.1 podaja nekaj značilnih vrednosti c_p trdnih snovi in kapljev, merjenih pri sobni temperaturi.

Tabela 3.1: Prikaz nekaterih značilnih vrednosti c_p trdnih snovi in kapljev pri sobni temperaturi. Prilagojeno po [27].

Snov	Voda	Zrak	Aluminij	Baker	Zlato	Železo	Svinec	Steklo	Etilni alkohol	Živo srebro
c_p [J/kg·K]	4186	1007	900	387	129	448	128	840	2400	140

Obstajajo trije načini prenosa toplote, in sicer prevajanje, konvekcija in sevanje. Za to nalogo sta relevantna le prva dva, zato bosta v nadaljevanju edina obravnavana podrobneje.

3.1 Prevajanje toplote

Prevajanje toplote, včasih imenovano tudi difuzija, je način prenosa toplote med snovmi, ki so med seboj v fizičnem stiku – t.i. *toplotnem stiku*. Na mikroskopski skali gre za neposredno izmenjavo kinetične energije delcev skozi mejo med dvema sistemoma. Prevajanje je način prenosa toplote, kjer gibanje oz. potovanje delcev ni neposredno prisotno. Je glavni mehanizem prenosa toplote znotraj trdnin in med trdnimi snovmi. Tekočine (predvsem plini) so v primerjavi s trdnimi snovmi slabo prevodne.

Prevajanje toplote opisuje t.i. *Fourierov zakon*, ki pravi, da je toplotni tok sorazmeren površini, pravokotni na njegovo smer, in negativnemu gradientu temperature. V splošnem se ga zapiše kot

$$\mathbf{q} = -\lambda \nabla T, \quad (3.4)$$

pogosto pa je v rabi bolj povedna oblika

$$P_i = \dot{Q}_i = -\lambda A_i \frac{\partial T}{\partial i} \quad i = \{x, y, z\}, \quad (3.5)$$

kjer je P_i toplotni tok v dani smeri (z enoto $W = J/s$), A_i površina, pravokotna na toplotni tok, $\frac{\partial T}{\partial i}$ odvod temperature v dani smeri in λ sorazmernostni koeficient, imenovan *toplotna prevodnost* (z enoto $W/m \cdot K$). Gre za neke vrste mero sposobnosti prevajanja toplote določene snovi. Tiste z visoko vrednostjo λ imenujemo toplotni prevodniki (kovine), tiste z nizko pa toplotni izolatorji (tekočine in npr. volna ter stiropor). Nekaj značilnih vrednosti za toplotno prevodnost snovi pri sobni temperaturi podaja tabela 3.2.

Tabela 3.2: Prikaz nekaterih značilnih vrednosti λ trdnih snovi in kapljev in pri sobni temperaturi. Prilagojeno po [27].

Snov	Voda	Zrak	Aluminij	Baker	Zlato	Železo	Svinec	Steklo	Volna	Stiropor
$\lambda [W/m \cdot K]$	0,6	0,026	237	386	317	80,2	35,3	1	0,04	0,033

3.2 Konvekcija

Konvekcija je način prenosa toplote zaradi gibanja tekočine. Običajno je to prevladujoča oblika prenosa toplote v kapljevinah in plinih, medtem ko v večini trdnih snovi ne more potekati. Ločimo dve vrsti konvekcije, in sicer *naravno* in *vsiljeno*.

Pri naravni konvekciji pride do toka tekočine zaradi gostotnih razlik, ki so posledica temperaturnih sprememb znotraj tekočine. S segrevanjem se namreč tekočinam gostota navadno povečuje in tako se toplejši deli zaradi vzgona začnejo dvigovati. V sklenjenem krogu to vodi v naravno kroženje in prenos toplote – segreta (in zato lažja) tekočina se dviguje v hladnejše predele, pri tem oddaja toploto in se ohlajena (in zato težja) spušča nazaj navzdol [28]. Primer naravne konvekcije je kroženje vode v posodi na štedilniku.

O vsiljeni konvekciji pa govorimo takrat, ko tok tekočine ni posledica razlik v gostoti, ampak ga povzroči nek zunanji dejavnik, kot je npr. črpalka ali ventilator. V tem primeru so hitrosti pretoka višje kot pri naravni konvekciji, zaradi česar se poveča tudi prenos toplote.

Konvekcijo pogosto povezujemo s stikom med (sprva) mirujočo tekočino in od nje toplejšo trdno površino. Ta segreje stično plast tekočine, ki nato začne potovati

proti hladnejšim plastem in tako dá zagon celotnemu procesu. A to se ne zgodi vedno – ne smemo namreč pozabiti, da zaradi stika med trdnino in tekočino pride tudi do prevajanja toplote, pa čeprav šibkega. Merilo za doprinos konvekcije v primerjavi s prevajanjem (v smislu razmerja hitrosti prenosa toplote z eno in drugo vrsto oz. njunih časovnih skal) je t.i. *Rayleighovo število*, ki s svojo vrednostjo hkrati določa tudi vrsto morebitnega induciranelega toka tekočine. Definirano je kot

$$\text{Ra} = \frac{g\beta\Delta TL^3\rho}{\mu\alpha}, \quad (3.6)$$

kjer je g gravitacijski pospešek, β temperaturni koeficient prostorninskega raztezka tekočine, ΔT razlika temperatur stične površine in tekočine daleč stran od stika, L karakteristična dolžina in ρ gostota tekočine. μ predstavlja dinamično viskoznost tekočine in $\alpha = \lambda/\rho c_p$ njeno termično difuzivnost. Konvekcija se pojavi pri vrednosti Ra med 1000 in 2000 ([29] in [30] navajata konkretno vrednost 1708), pri čemer je za $\text{Ra} < 10^8$ inducirani tok laminaren, prehod v turbulentnost pa se zgodi nekje znotraj intervala $10^8 < \text{Ra} < 10^{10}$ [31].

Osnovna enačba za prenos toplote s konvekcijo je

$$P = hA(T_s - T_f), \quad (3.7)$$

kjer je P toplotni tok, A površina stične ploskve, T_s njena temperatura in T_f temperatura tekočine. Natančna definicija slednje je odvisna od podrobnosti primera. Pri pretoku ob površini je T_f temperatura tekočine daleč stran od površine, pri vre-nju ali kondenzaciji je to temperatura nasičenja tekočine, pri toku v cevi pa gre za povprečno temperaturo na določenem prerezu cevi [32]. Sorazmernostni koeficient h imenujemo *toplotna prestopnost*. Definirana je kot toplota, ki se prenese med snovema na stični površini 1 m^2 pri temperaturni razliki $1 \text{ }^\circ\text{C}$ in je običajno izražena v $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$. Toplotna prestopnost ni snovna značilnost, saj je odvisna od oblike in sestave trdnega dela stične ploskve ter lastnosti in režima gibanja tekočine. Njene vrednosti za nekaj tipičnih primerov vsebuje tabela 3.3. Opazimo lahko, da so za iste snovi pri vsiljeni konvekciji toplotne prestopnosti višje kot pri naravni (kar, kot rečeno, vodi v večji prenos toplote).

Tabela 3.3: Prikaz vrednosti h za nekaj tipičnih primerov. Prilagojeno po [33, 34, 35].

Način in snov	h [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
Naravna konvekcija - zrak, plini in suhi hlapi	5 - 37
Naravna konvekcija - voda in kapljevine	50 - 3000
Vsiljena konvekcija - zrak, plini in suhi hlapi	10 - 1000
Vsiljena konvekcija - voda in kapljevine	50 - 10 000
Vsiljena konvekcija - tekoče kovine	5000 - 40 000
Vrela voda	3000 - 25 000
Kondenzirajoča vodna para	5000 - 100 000

4. Ansys Fluent

Raziskavo hlajenja senzorskih modulov smo opravili s pomočjo simulacij v programski opremi *Ansys Fluent* [36] s študentsko licenco [37] (verzija 2024 R2), ki dodatno vsebuje še nabor večine ostalih programov podjetja Ansys. Gre za splošno programsko opremo za računalniško dinamiko tekočin (ang. *computational fluid dynamics*, CFD), ki se uporablja npr. za modeliranje pretoka tekočin, prenosa toplote in mase ter kemijskih reakcij. Fluent za svoje simulacije uporablja t.i. *metodo končnih volumnov* (ang. *finite volume method*, FVM), ki jo bomo predstavili v nadaljevanju.

4.1 Metoda končnih volumnov

Metoda končnih volumnov je diskretizacijska metoda za aproksimacijo enega ali več ohranitvenih zakonov v obliki parcialnih diferencialnih enačb in sestoji iz sledečih korakov:

1. Razdelitev celotnega obravnavanega območja v množico manjših prostornin, imenovanih *kontrolni volumni*, *celice* ali *končni volumni* (od tod ime metode), z opredeljenimi računskimi vozlišči. Te celice skupaj tvorijo t.i. *mrežo*.
2. Zapis integralne oblike ohranitvenih zakonov za vsako prostornino in uporaba Gaussovega izreka o divergenci za izračun tokov na površinah celic.
3. Aproksimacija površinskih in prostorninskih integralov z uporabo kvadraturnih formul glede na vrednosti funkcij v računskih vozliščih.
4. Hkratno ali iterativno reševanje dobljenega niza linearnih algebrskih enačb za izračun vrednosti spremenljivk v vsakem računskem vozlišču.

Za lažjo predstavo si oglejmo preprost primer s področja prevajanja toplote, povzet po [38].

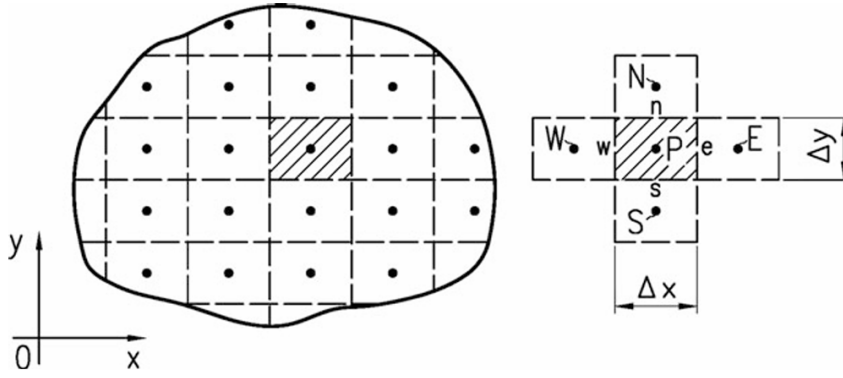
4.1.1 Preprost primer uporabe FVM

Analizirajmo ohranitev energije v kartezičnem koordinatnem sistemu s pomočjo prehodne enačbe prevajanja toplote v dveh dimenzijah.

Za obravnavano območje debeline d z gostoto ρ , specifično toploto c in toplotno prevodnostjo λ z notranjimi viri toplotnega toka na prostorninsko enoto q_V lahko enačbo prevajanja toplote zapišemo kot

$$c(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{q} + q_V, \quad (4.1)$$

kjer T označuje temperaturo, t čas in $\mathbf{q}$ gostoto toplotnega toka. Območje je razdeljeno na celice z dimenzijami Δx , Δy in d (slika 4.1).



Slika 4.1: Prikaz dvodimenzionalnega območja, razdeljenega na kontrolne volumne (levo) in računsko obravnavanega izseka (desno). Celice imajo dimenziji Δx in Δy , njihova središča in hkrati računsko vozlišča pa so označena z N, P, S, W in E. Pridobljeno iz [38].

Z integracijo enačbe (4.1) po kontrolnem volumnu dobimo zvezo

$$\int_{CV} c(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} dV = - \int_{CV} \nabla \cdot \mathbf{q} dV + \int_{CV} q_V dV, \quad (4.2)$$

kjer CV označuje kontrolni volumen. Ko uporabimo Gaussov izrek o divergenci na prvem členu desne strani enačbe (4.2), dobimo

$$\int_{CV} \nabla \cdot \mathbf{q} dV = \int_{CS} \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} dS \quad (4.3)$$

in enačba (4.2) se lahko tako prepiše v

$$\int_{CV} c(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} dV = - \int_{CS} \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} dS + \int_{CV} q_V dV, \quad (4.4)$$

kjer CS označuje površino kontrolnega volumna in $\mathbf{n}$ njen enotski normalni vektor.

Če z ΔV označimo prostornino izbrane celice (na sliki 4.1 je njeno računsko vozlišče označeno s P), lahko posamezne člene v (4.4) ocenimo kot

$$\begin{aligned} \int_{CV} c(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} dV &\cong \Delta V c(T_P) \rho(T_P) \frac{dT_P}{dt} \\ - \int_{CS} \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} dS &= \sum_{i=1}^4 Q_i \\ \int_{CV} q_V dV &\cong \Delta V q_V(T_P), \end{aligned} \quad (4.5)$$

kjer T_P označuje temperaturo v vozlišču P, Q_i pa toplotni tok, ki se v celico z vozliščem P preteče iz posamezne sosednje celice. Z vstavitvijo gornjih ocen v (4.4) dobimo sledečo enačbo toplotne bilance:

$$\Delta V c(T_P) \rho(T_P) \frac{dT_P}{dt} = \sum_{i=1}^4 Q_i + \Delta V q_V(T_P), \quad (4.6)$$

ki jo bomo v nadaljevanju zapisali v pripadajočem koordinatnem sistemu.

Ponovno si oglejmo desni del slike 4.1. Prostornina posamezne celice znaša $\Delta V = (\Delta x)(\Delta y)d$, toplota pa v celico z vozliščem P teče iz sosednjih celic, katerih vozlišča so označena z W, N, E in S. Pripadajoče toplotne tokove lahko torej zapišemo kot

$$\begin{aligned} Q_{W-P} &= (\Delta y) d q_{W-P} = (\Delta y) d \frac{\lambda(T_W) + \lambda(T_P)}{2} \cdot \frac{T_W - T_P}{\Delta x} \\ Q_{N-P} &= (\Delta x) d q_{N-P} = (\Delta x) d \frac{\lambda(T_N) + \lambda(T_P)}{2} \cdot \frac{T_N - T_P}{\Delta y} \\ Q_{E-P} &= (\Delta y) d q_{E-P} = (\Delta y) d \frac{\lambda(T_E) + \lambda(T_P)}{2} \cdot \frac{T_E - T_P}{\Delta x} \\ Q_{S-P} &= (\Delta x) d q_{S-P} = (\Delta x) d \frac{\lambda(T_S) + \lambda(T_P)}{2} \cdot \frac{T_S - T_P}{\Delta y}. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Nesimo gornje izraze v (4.6) in enačbo preuredimo, da dobimo končno obliko

$$\begin{aligned} \frac{dT_P}{dt} &= \alpha_P \left[\frac{\lambda(T_W) + \lambda(T_P)}{2\lambda(T_P)} \cdot \frac{T_W - T_P}{(\Delta x)^2} + \frac{\lambda(T_N) + \lambda(T_P)}{2\lambda(T_P)} \cdot \frac{T_N - T_P}{(\Delta y)^2} + \right. \\ &\quad \left. \frac{\lambda(T_E) + \lambda(T_P)}{2\lambda(T_P)} \cdot \frac{T_E - T_P}{(\Delta x)^2} + \frac{\lambda(T_S) + \lambda(T_P)}{2\lambda(T_P)} \cdot \frac{T_S - T_P}{(\Delta y)^2} \right] + \frac{q_V(T_P)}{c(T_P)\rho(T_P)}, \end{aligned} \quad (4.8)$$

kjer smo z α_P označili $\lambda(T_P)/c(T_P)\rho(T_P)$. V stacionarnem stanju ($dT_P/dt = 0$) pri enoviti mreži ($\Delta x = \Delta y$) ter konstantnih in temperaturno neodvisnih termičnih lastnostih in virih toplote se enačba (4.8) poenostavi v

$$T_W + T_N + T_E + T_S - 4T_P + \frac{q_V \cdot (\Delta x)^2}{\lambda} = 0. \quad (4.9)$$

Na tem mestu spomnimo, da smo računanje v tem podrazdelku opravili za eno samo celico – reševanje problema za celotno območje bi zahtevalo zapis podobnih enačb za vsako izmed celic in nato reševanje dobljenega sistema enačb. Poleg tega bi tudi s takšnim pristopom prišli le do vrednosti temperature v posameznih vozliščih – razširitev na celotno območje nadalje zahteva uporabo ustreznih interpolacijskih shem [39].

Sedaj si oglejmo nekaj konceptov v zvezi z računskimi postopki, ki jih Fluent uporablja pri svojih simulacijah. Sledimo [31], pri čemer bomo opisali le tiste, ki so pomembni za naše simulacije oz. smo jih uporabili tudi mi.

4.2 Prenos toplote

Fluent v splošnem rešuje energijsko enačbo v obliki

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \left(h - \frac{p_{op} + p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \right) \right) + \nabla \cdot \left(\rho \mathbf{v} \left(h + \frac{v^2}{2} \right) \right) = \\ = \nabla \cdot \left(\lambda_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \mathbf{J}_j + \bar{\tau}_{eff} \cdot \mathbf{v} \right) + S_h, \end{aligned} \quad (4.10)$$

ki se v trdnih snoveh ter nestisljivih tokovih brez viskoznega gretja¹ in difuzije poenostavi v

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\mathbf{v} \rho h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_h, \quad (4.11)$$

¹Pri obravnavi nestisljivih tokov pogosto zanemarimo delo tlaka p/ρ in kinetični člen $v^2/2$ [31], odsotnost viskoznega gretja $\bar{\tau}_{eff} \cdot \mathbf{v}$ za naše simulacije pa bomo upravičili v poglavju 5.

kjer je t čas, ρ gostota, $h = \int_{T_{ref}}^T c_p dT$ občutena entalpija (ang. *sensible enthalpy*), pri čemer T_{ref} za našo vrsto simulacij privzeto znaša 25 °C, λ toplotna prevodnost in T temperatura. Drugi člen na levi strani enačbe (4.11) predstavlja konvekcijski prenos toplote zaradi rotacije ali translacije, pri čemer se hitrostno polje $\mathbf{v}$ izračuna iz gibanja, določenega za obravnavano območje. Na desni strani sta po vrsti prenos toplote s prevajanjem in vsi prostorninski viri toplote.

4.2.1 Anizotropna prevodnost v trdnih snoveh

V primeru, da trdnina toploto prevaja anizotropno in je torej njena toplotna prevodnost izražena v obliki matrike, se vektor gostote toplotnega toka zapiše kot

$$q_i = \lambda_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j}, \quad (4.12)$$

kjer je λ_{ij} tenzor toplotnih prevodnosti, v globalnih koordinatah izražen kot

$$\lambda_{ij} = \lambda_{glob} = \begin{bmatrix} \lambda_{xx} & \lambda_{xy} & \lambda_{xz} \\ \lambda_{yx} & \lambda_{yy} & \lambda_{yz} \\ \lambda_{zx} & \lambda_{zy} & \lambda_{zz} \end{bmatrix}.$$

V ortotropnih primerih lahko λ_{glob} izračunamo tudi kot

$$\lambda_{glob} = A \lambda_{loc} A^T, \quad (4.13)$$

kjer je λ_{loc} s strani uporabnika določena matrika toplotnih prevodnosti:

$$\lambda_{loc} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix}.$$

A je transformacijska matrika in vsebuje tri glavne smeri za vsako celico mreže:

$$A = \begin{bmatrix} e_{xx} & e_{xy} & e_{xz} \\ e_{yx} & e_{yy} & e_{yz} \\ e_{zx} & e_{zy} & e_{zz} \end{bmatrix}.$$

4.3 Osnove laminarnega toka

Pri obravnavi laminarnega toka in tudi nasploh kakršnegakoli toka tekočin je treba poskrbeti za ohranitev treh količin, in sicer mase, gibalne količine in energije. Slednja je bila obravnavana v prejšnjem razdelku, zato se sedaj posvetimo drugima dvema.

4.3.1 Ohranitev mase

Ohranitev mase opisuje t.i. *kontinuitetna enačba*, ki se glasi

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = S_m, \quad (4.14)$$

kjer S_m predstavlja vir (dodatne) mase.

4.3.2 Ohranitev gibalne količine

Ohranitev gibalne količine opisuje enačba

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}, \quad (4.15)$$

kjer je p statični tlak, $\bar{\bar{\tau}}$ tenzor strižnih napetosti in $\rho \mathbf{g}$ gravitacijska sila, $\mathbf{F}$ pa vsebuje vse ostale zunanje sile in druge izvore, specifične za določen model. Tenzor strižnih napetosti $\bar{\bar{\tau}}$ je podan kot

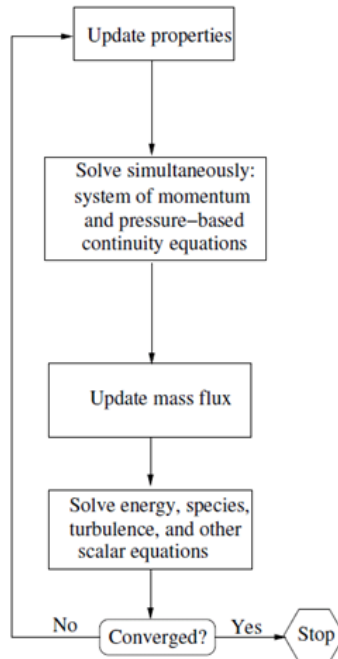
$$\bar{\bar{\tau}} = \mu \left[(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{v} I \right], \quad (4.16)$$

kjer je μ dinamična viskoznost in I enotski tenzor. Drugi člen na desni strani enačbe zajema učinek povečanja prostornine in je pomemben le za obravnavo stisljivih tekočin.

4.4 Kratek opis reševalnika

Za naše simulacije smo izbrali t.i. *reševalnik na podlagi tlaka* (ang. *pressure-based solver*), ki tradicionalno služi reševanju problemov z nestisljivimi tokovi nizkih hitrosti. Ta uporablja algoritem, pri katerem se pogoj ohranjanja mase (oz. *kontinuitete*) hitrostnega polja doseže z reševanjem enačbe za tlak (ali korekcijo tlaka). Le-ta je izpeljana iz kontinuitetnih in gibalnih enačb na način, da hitrostno polje, popravljen s tlakom, izpolnjuje pogoj kontinuitete. Ker so vodilne enačbe nelinearne in med seboj sklopljene, postopek reševanja vključuje iteracije, pri katerih se celoten sklop vodilnih enačb rešuje večkrat, dokler rešitev ne dosega dovolj visoke stopnje natančnosti ali *konvergence*. Prikaz algoritma je na sliki 4.2.

Pressure-Based Coupled Algorithm

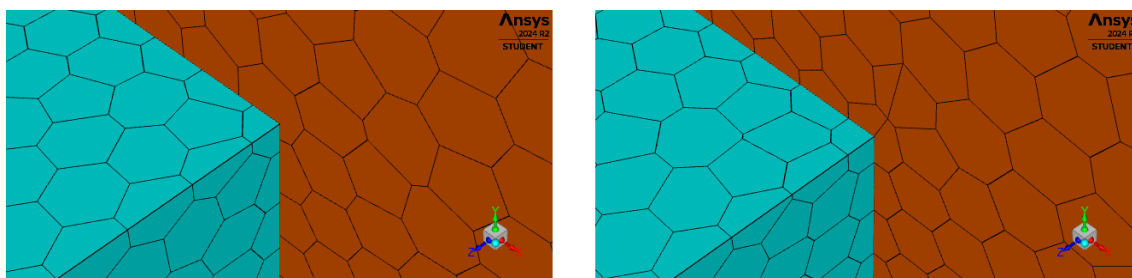


Slika 4.2: Prikaz sklopljenega algoritma na podlagi tlaka. Prvi korak zajema lastnosti tekočine, kot so npr. gostota, viskoznost in specifična toplota. Pridobljeno iz [31].

5. Postopek dela

Za izvajanje simulacij smo morali najprej pripraviti ustrezno geometrijo. Izdelali smo jo v programu *FreeCAD*, odprtokodnem parametričnem 3D modelirnem programu, namenjenem predvsem oblikovanju realnih predmetov vseh velikosti [40].

Geometrijo smo nato uvozili v modelirni program podjetja Ansys, imenovan *SpaceClaim*, ki je zasnovan s poudarkom na pripravi geometrije za simulacije. Tam smo izdelali oznake za najpomembnejše dele (kot so npr. robni pogoji), preverili smiselnost in kompaktnost geometrije ter na koncu uporabili funkcijo, imenovano *deljenje topologije* (ang. *share topology*). Gre za postopek, kjer se na stičnih ploskvah različnih teles ustvari ena, skupna ploskev. Tako se v fazi grajenja mreže zagotovi nastanek konformne oz. usklajene mreže, ki v večini primerov vodi do natančnejših rezultatov zaradi dobro definiranih stikov med posameznimi deli geometrije. Prikaz nekonformne in konformne mreže za primerjavo je na sliki 5.1.

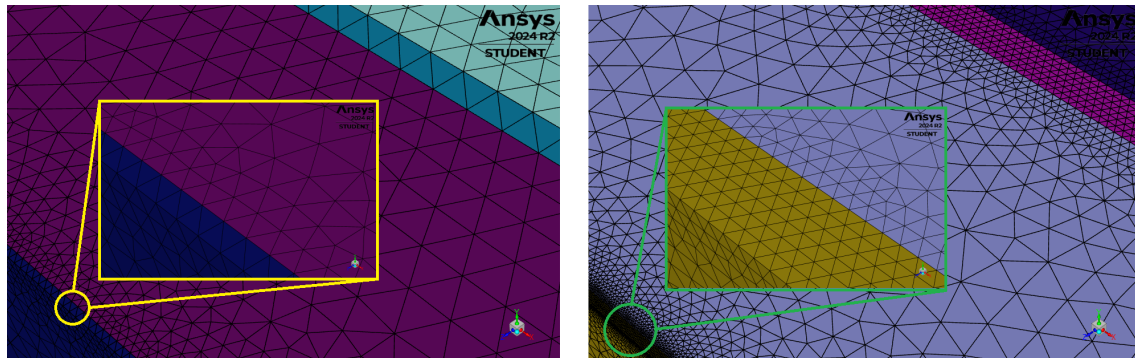


Slika 5.1: Prikaz nekonformne mreže (levo) in konformne mreže (desno), ki smo jo pridobili s pomočjo funkcije deljenja topologije. Vidimo, da se v drugem primeru robovi elementov oranžnega telesa skladajo z robovi modrega in je prehod med celicami enovit.

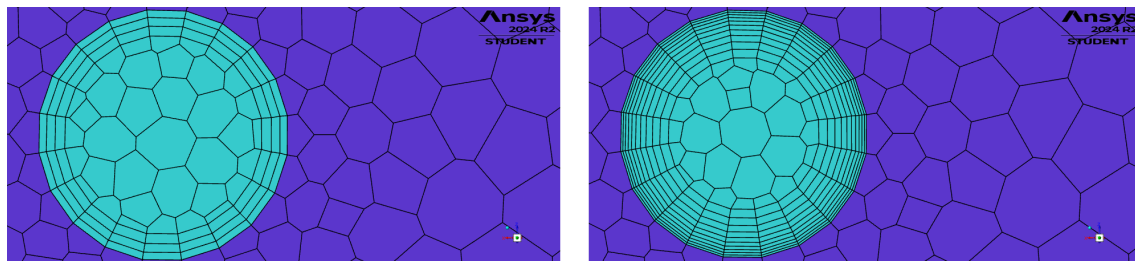
Nadalje smo za simulacije pripravljeno geometrijo uvozili v Fluent, kjer smo na njej izdelali mrežo, pri čemer smo s stališča kakovosti želeli doseči več ciljev. Prvi izmed njih je bil, da je najkrajša dimenzija vsake ploskve vsakega telesa (v praksi je šlo za debelino) sestavljena iz več kot enega elementa. To izboljša tako splošno natančnost računanja (zaradi večjega števila gradnikov mreže in posledično natančnejših aproksimacij) kot tudi natančnost prenosa količin (kot je npr. toplota) ter s tem določanja lastnih ali izpeljanih gradientov in profilov (kot je npr. temperaturni). Prikaz dveh mrež z različnih številom elementov na debelino je na sliki 5.2.

Drugi cilj je bil tako po motivaciji kot po izvedbi podoben prvemu, in sicer smo v primerih, kjer je bilo prisotno vodno hlajenje, želeli ustvariti čim več mejnih plasti (ang. *boundary layers*) na stiku med premikajočo-se tekočino in okoliško trdnino. Pri toku tekočine se namreč veliko kompleksnih pojavov ustvari ravno na njenih robovih (npr. ob stiku s cevjo). Njihova verodostojna in natančna reprezentacija sta v simulacijah s FVM pogosto mogoči le ob dovolj fini mreži na stiku ali z drugimi

besedami, ob zadostnem številu mejnih plasti. Dve mreži z različnim številom mejnih plasti sta prikazani na sliki 5.3.



Slika 5.2: Prikaz mreže, kjer sta debelini dveh teles sestavljeni le iz enega elementa (levo) in mreže, kjer je debelina vsakega telesa sestavljena iz več kot enega elementa (desno).



Slika 5.3: Prikaz mreže s tremi (levo) in desetimi (desno) mejnimi plastmi na stiku pritoka vode z okoliško trdnino.

Na ravni mreže smo želeli zagotoviti še njeno čim večjo kakovost z vidika metrik. Spremljali smo pravokotnost (ang. *orthogonal quality*), izkrivljenost (ang. *skewness*) in razmerje stranic (ang. *aspect ratio*). Prva je neke vrste merilo izravnosti postavitve stikov med elementi in je za posamezno celico definirana kot

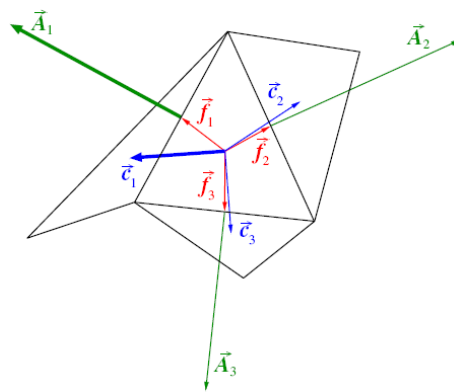
$$OQ = \min \left(\frac{\mathbf{A}_i \cdot \mathbf{f}_i}{|\mathbf{A}_i| \cdot |\mathbf{f}_i|}, \frac{\mathbf{A}_i \cdot \mathbf{c}_i}{|\mathbf{A}_i| \cdot |\mathbf{c}_i|} \right), \quad i = 1, \dots, N, \quad (5.1)$$

kjer je $\mathbf{A}_i$ normalni vektor ene izmed celici sosednjih ploskev, $\mathbf{f}_i$ vektor od težišča izbrane celice do ene izmed njej sosednjih ploskev in $\mathbf{c}_i$ vektor od težišča izbrane celice do težišča ene izmed sosednjih celic, i pa teče po vseh celici sosednjih ploskvah (v pomoč pri predstavi je lahko slika 5.4). Njena vrednost se giblje med 0 (najslabše) in 1 (najboljše).

Izkrivljenost določa, kako blizu idealni (enakostranični ali enakokotni) je določena ploskev ali celica. Tudi njena vrednost se giblje med 0 in 1, a tokrat prva predstavlja ideal in druga popolno degeneriranost.

Razmerje stranic ploskve ali celice pa je definirano kot razmerje med dolžino najdaljšega in najkrajšega roba. Teoretično lahko zavzame vrednosti od ena do neskončno, pri čemer ena pomeni enakostraničen lik oz. celico [41].

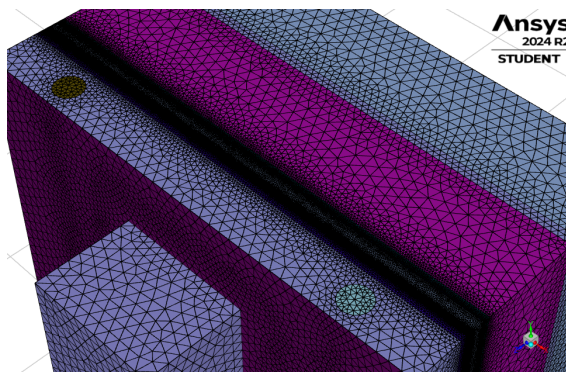
V tabeli 5.1 so zbrani intervali teh metrik za naše mreže skupaj s priporočenimi mejnimi vrednostmi s strani podjetja Ansys, sliki 5.5 in 5.6 pa prikazujeta primer površinske in njej pripadajoče prostorninske mreže skupaj s prerezom slednje.



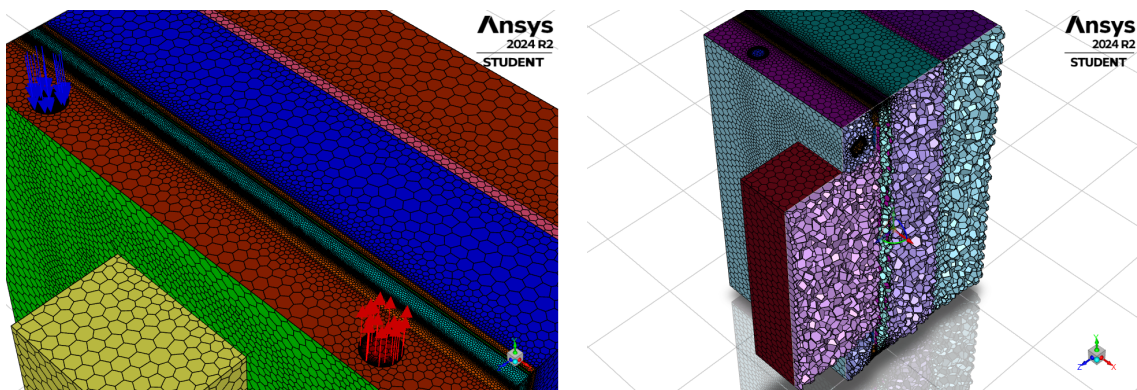
Slika 5.4: Grafični prikaz vektorjev $\vec{A}_i$, $\vec{f}_i$ in $\vec{c}_i$ za $N = 3$. Pridobljeno iz [42].

Tabela 5.1: Prikaz priporočenih mejnih vrednosti metrik kvalitete mreže skupaj z mejnimi in povprečnimi vrednostmi za naše mreže. Pri razmerju stranic smo v vseh primerih, kjer je bila mejna vrednost višja od 90, imeli eno samo tako celico.

Metrika	Pravokotnost	Izkrivljenost	Razmerje stranic
Priporočena mejna vrednost	$> 0,1$	$< 0,7$ oz. $0,85$, če je povprečje mnogo nižje	< 100
Mejna vrednost	$0,15 - 0,29$	$0,66 - 0,85$	$24,3 - 119$
Povprečna vrednost	$0,92 - 0,98$	$0,02 - 0,08$	$2,03 - 4,50$



Slika 5.5: Prikaz površinske mreže, iz katere je nastala sledeča prostorninska mreža.



Slika 5.6: Prikaz prostorninske mreže skupaj z njenim prerezom, kjer lahko vidimo posamezne celice. Prikazana sta tudi robna pogoja pritoka in odtoka.

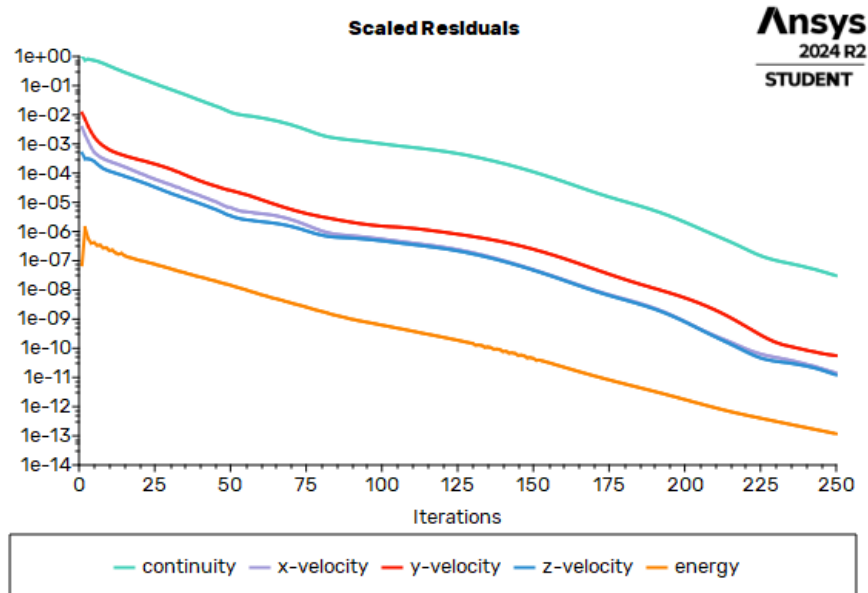
Ko je bila mreža enkrat pripravljena za simulacijo, smo začeli postavljati problem. Najprej smo v naboru modelov izbrali energijskega, ki omogoča računanje prenosa toplote. V simulacijah z vodnim hlajenjem smo dodatno izbrali še laminaren viskozni model, saj je Reynoldsovo število za naše primere tudi pri najvišji obravnavani hitrosti pretoka znašalo le 1320¹. Na tem mestu smo tudi preverili vrednost t.i. *Brinkmanovega števila*, ki je merilo moči viskoznega gretja. Definirano je kot

$$\text{Br} = \frac{\mu v^2}{\lambda(T_s - T_f)} = \frac{\mu v^2}{\lambda \Delta T}, \quad (5.2)$$

kjer je μ dinamična viskoznost, v hitrost tekočine, λ toplotna prevodnost tekočine, T_s temperatura stične ploskve med trdnino in tekočino in T_f temperatura tekočine. Prispevek viskoznega gretja postane pomemben, ko je vrednost Br blizu ali nad ena [31]; v našem primeru je tudi ob popolnem pretiravanju s postavitvijo $\Delta T = 0,01^\circ\text{C}$ znašala 0,023.

Zatem smo definirali materiale skupaj z njihovimi zahtevanimi lastnostmi (katere smo obravnavali kot konstantne) in jih pripisali ustreznim telesom domene. Sledilo je postavljanje robnih pogojev in spremljanja ostankov (ang. *residuals*), ki so prvi indikator stopnje konvergence rešitve. Nato smo rešitev inicializirali, nastavili število iteracij in pognali simulacijo.

Ko se je nadaljevano število iteracij izteklo, smo preverili profil in končno vrednost ostankov (primer je na sliki 5.7) ter kot nepristranski in najpomembnejši kazalnik konvergence preverili ravnovesje tokov, in sicer masnega in toplotnega. Po potrebi smo reševanje nadaljevali z dodatnimi iteracijami.



Slika 5.7: Primer profila ostankov za maso (*continuity*), gibalno količino (opisano s tremi komponentami hitrosti x -, y - in z -*velocity*) in energijo (*energy*) za 250 iteracij. Vidimo, da vsi padajo in da je potek zložen, kar je znak gladke konvergence rešitve.

¹Reynoldsovo število Re je merilo turbulentnosti toka. Za pretoke po ceveh velja, da je za $Re < 2300$ tok laminaren, prehod v turbulenco pa se zgodi na intervalu $2300 < Re < 4000$.

6. Rezultati

Raziskave hlajenja senzorskih modulov smo se lotili postopoma, kar pomeni, da smo geometrijo sproti dograjevali in prilagajali. Kljub temu je njena osnovna ploskev vselej znašala $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$, pa tudi vsi ključni gradniki so bili prisotni vse od začetka.

Prvi izmed teh gradnikov je seveda silicijeva fotopomnoževalka. Naš modul sestavlja 32 SiPM dimenzij $6\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ v obliki mreže 8×4 , kar znese $48\text{ mm} \times 48\text{ mm}$. Čeprav so načeloma zložene druga od drugo, je med njimi vseeno potrebna minimalna razdalja, da ne pride do električnega stika. Tako smo jih simulirali kot homogeno, $0,2\text{ mm}$ debelo ploščo silicija, kjer smo preostala dva milimetra na vsaki strani pripisali ravno tem razdaljam.

Silicijeva fotopomnoževalka je pripeta na ploščo s tiskanim vezjem (ang. *printed circuit board*, PCB). Gre za mehansko podlago, ki se uporablja za namestitve in povezovanje komponent električnega vezja. Osnovni sloj PCB je običajno izdelan iz kombinacije močnih, električno neprevodnih materialov, ki zagotavljajo izolacijo, odpornost na vodo in temperaturno stabilnost [43]. Najpogosteje uporabljen takšen material je FR-4, ki je sestavljal tudi naš začetni model PCB – ploščo debeline 2 mm .

Na drugo stran tiskanega vezja so pritrjeni čipi, katerih osnovna funkcija je obdelava in manipuliranje z električnimi signali, pri čemer izvajajo različne procese, kot so ojačanje signalov in njihov nadzor, računanje in shranjevanje podatkov [44]. Zagotavljajo torej procesno moč, pomnilniško shranjevanje in ostale specializirane funkcije, zaradi česar so hkrati tudi vir toplote – tako kot v naših simulacijah. Za nas so pomembni čipi *FastIC*. Gre za močno prilagodljive, večkanalne čipe ASIC (ang. *application-specific integrated circuit*), ki so namenjeni prav odčitavanju fotosenzorjev. Odlikuje jih sposobnost branja senzorjev s signali tako pozitivne kot negativne polaritete, lastno ojačanje signala ter digitalizirano merjenje energije in časa prihoda zaznanih dogodkov s pikosekundno časovno ločljivostjo [45]. Za nas pa je najpomembnejši podatek, da proizvedejo 12 mW toplotnega toka na kanal. Simulirali smo štiri takšne čipe, in sicer sprva kot bakrene, nato pa silicijeve kvadre dimenzij $12\text{ mm} \times 12\text{ mm} \times 0,1\text{ mm}$ s 64 kanali, kar celokupno znese približno 3 W proizvedenega toplotnega toka oz. $0,75\text{ W}$ na čip.

Pod SiPM se nahaja scintilator. Simulirali smo ga kot 10 mm debelo ploščo z lastnostmi, ki ustrezajo scintilatorju LSO.

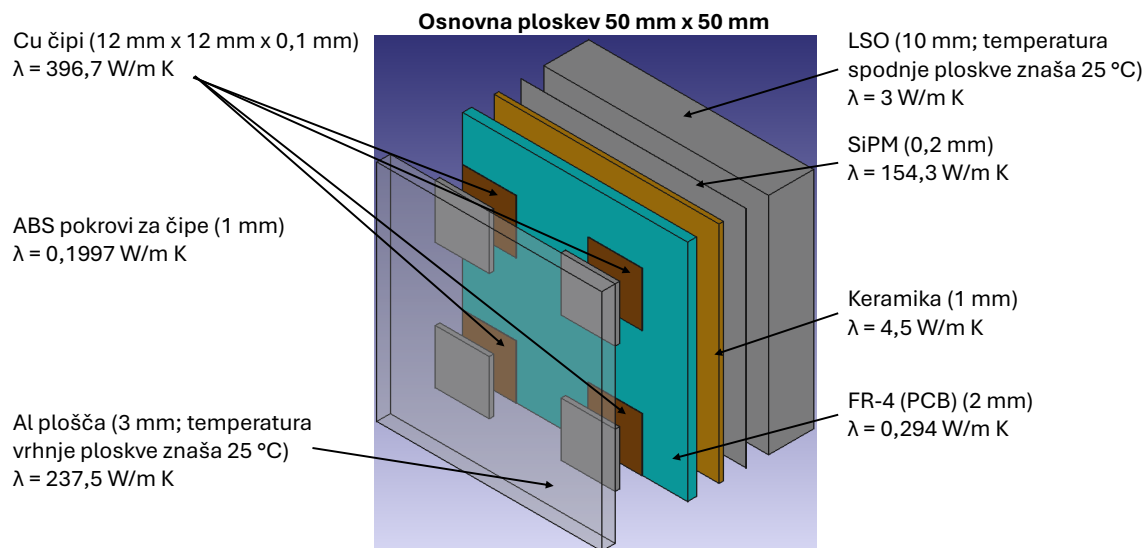
Zadnji element je bil prevoden pokrov, navadno aluminijast in debel 3 oz. 5 mm .

S stališča rezultatov simulacij so nas najbolj zanimali temperaturni profil na prednji ploskvi SiPM (fotonska ravnina) in na ploskvi stičišča PCB s čipi (ravnina čipov), maksimalna temperatura na teh dveh ploskvah in razlika med maksimalno in minimalno temperaturo na fotonski ravnini.

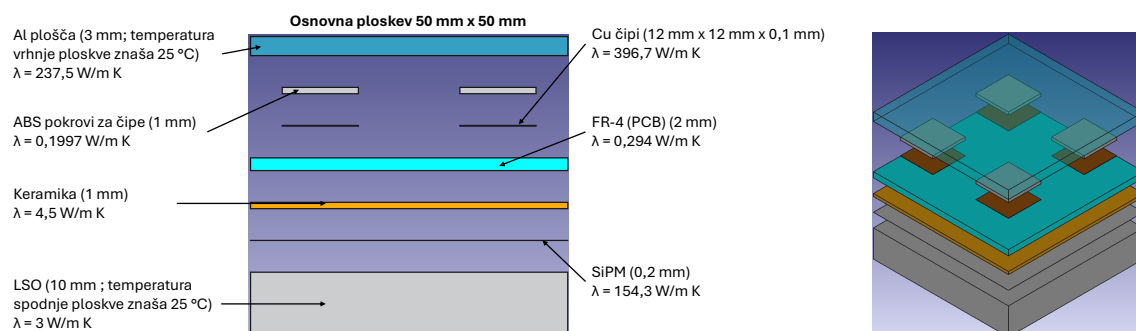
6.1 Osnovna geometrija

Našo osnovno geometrijo je sestavljalo ravno zgoraj opisanih pet elementov, pri čemer sta bila dodatno prisotna še dva – 1 mm debeli pokrovi za čipe, narejeni iz plastike ABS, ki služijo simuliranju pakiranja čipov BGA (ang. *ball grid array*), in 1 mm debela keramična plošča med PCB in SiPM, ki preprečuje zvijanje PCB in tako skrbi za mehansko trdnost. Celotna geometrija je prikazana na slikah 6.1 in 6.2, tabela 6.1 pa vsebuje za simulacijo pomembne lastnosti uporabljenih materialov. Poleg proizvajanja toplote s strani čipov sta bila druga robna pogoja temperatura vrhnje ploskve aluminijastega pokrova in spodnje ploskve LSO, ki smo ju postavili na 25 °C.

Dobljena temperaturna profila na ravnini čipov in na fotonski ravnini sta prikazana na sliki 6.3.



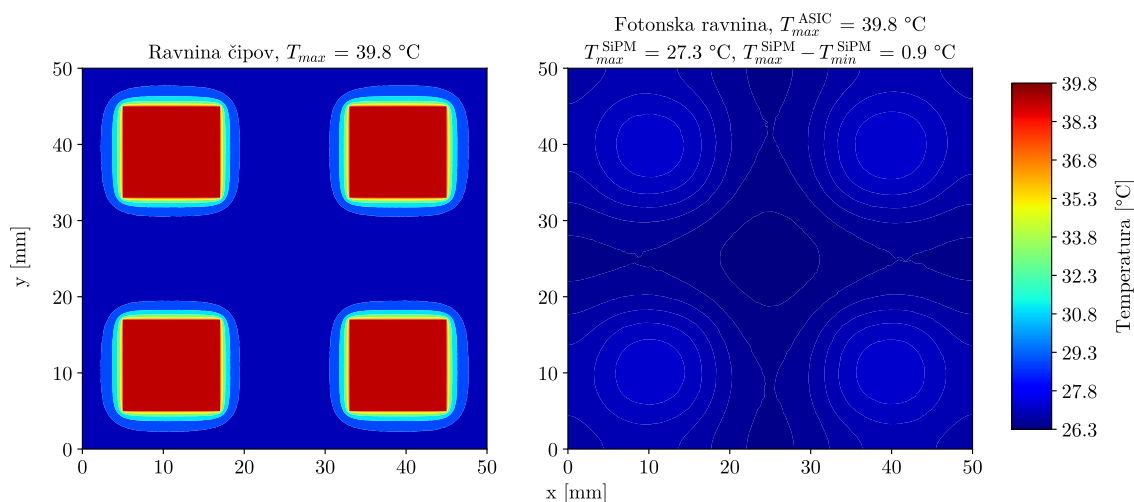
Slika 6.1: Prikaz osnovne geometrije s pripadajočimi dimenzijami elementov in njihovimi toplotnimi prevodnostmi. Razporeditev čipov in pokrovov je bila v resnici vselej simetrična, takšen prikaz je le posledica izometrične projekcije.



Slika 6.2: Stranski prikaz osnovne geometrije s pripadajočimi dimenzijami elementov in njihovimi toplotnimi prevodnostmi (levo) in prikaz tlorisa osnovne geometrije v izometrični projekciji (desno).

Tabela 6.1: Prikaz za simulacijo pomembnih lastnosti uporabljenih materialov.

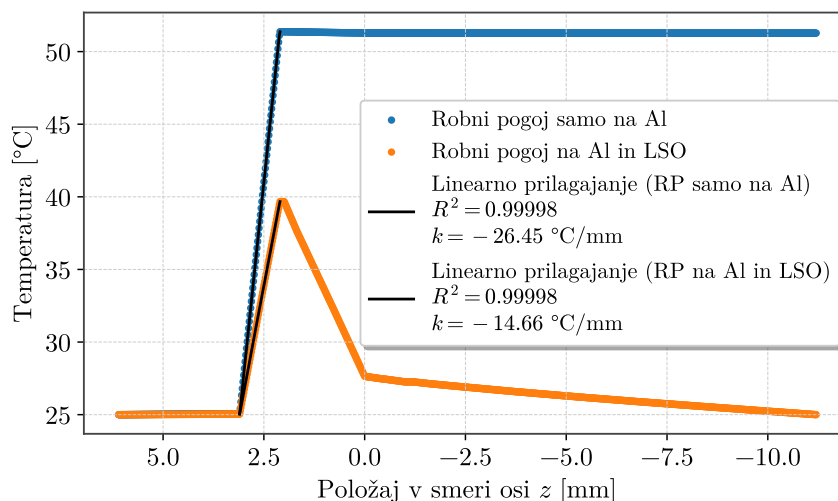
Material	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kg·K]	λ [W/m·K]
FR-4	1900	1150	0,294
Si	2329	695,1	154,3
Cu	8942	383,3	396,7
Al	2689	951	237,5
ABS	1030	1400	0,1997
Keramika	4900	800	4,5
LSO	7400	304,7	3



Slika 6.3: Prikaz temperaturnih profilov na ravnini čipov (levo) in na fotonski ravnini (desno). Izpisani sta pripadajoči maksimalni temperaturi čipov in SiPM ter temperaturna razlika na fotonski ravnini.

Vidimo, da so na ravnini čipov visoke temperature skoncentrirane na in okrog čipov, kar je smiselno, saj so to grelna telesa. Najvišja temperatura znaša slabih 40 °C, na fotonski ravnini pa več kot 10 °C manj, konkretno 27,3 °C. Variacija znaša le slabo stopinjo. Vidimo tudi, da sta oba profila simetrična, kar je glede na geometrijo in postavitev robnih pogojev smiselno in pričakovano.

Kot zanimivost si na sliki 6.4 oglejmo potek temperature po liniji skozi središče enega od čipov, kjer smo prikazali še rezultate za simulacijo z robnim pogojem 25 °C le na vrhnji ploskvi aluminijastega pokrova. Vidimo, da se gradient ob odstranitvi pogoja na LSO poveča skoraj za faktor dva. Kljub temu pa je tudi sprememba slabih 15 °C na mm ogromna.



Slika 6.4: Prikaz temperaturnih profilov po liniji skozi sredino čipa za primer z robnim pogojem $25 \text{ } ^\circ\text{C}$ samo na Al in robnim pogojem $25 \text{ } ^\circ\text{C}$ na Al in LSO s pripadajočima linearnima prilagajanjema največjemu gradientu. Izpisani sta obe njegovi vrednosti skupaj z vrednostjo R^2 kot merilom kvalitete prilagajanja. Potek osi x je zaradi lažje predstave v skladu s prikazom geometrije na sliki 6.1 obrnjen.

6.2 Vpliv debeline ABS pokrovov in keramike

V naslednjem koraku nas je zanimalo, kako na obravnavane temperature vplivata debelina ABS pokrovov za čipe in debelina keramične plošče med PCB in SiPM. Raziskavo vplivov prve smo opravili na dograjeni geometriji (slike 6.5, 6.6, 6.7 in 6.8).

Prva sprememba je dodatek milimetrске plošče iz ABS pod LSO, ki služi simuliranju pakiranja celotnega modula v škatlico. Na straneh geometrije nismo dodali ničesar, saj bo v realnem sistemu več modulov zloženih drug ob drugega. Zaradi tega so v simulaciji to tudi adiabatne površine. Pod ploščo ABS se nahaja centimetrska plast zraka, ki služi simulaciji okolice pred modulom. Na njeno spodnjo ploskev smo tudi predstavili pogoj $25 \text{ } ^\circ\text{C}$ s spodnje ploskve LSO.

Druga velika sprememba je v sestavi PCB, saj ti v resnici niso ena sama plošča FR-4, ampak so sestavljeni iz več plasti. Naš model smo dogradili s še eno ploščo FR-4, med obe pa smo dodali plast bakra. S tem smo simulirali ozemljitveno ravnino, ki služi predvsem kot povratna pot za tok iz različnih komponent na plošči, poleg tega pa s svojo visoko vrednostjo λ (glej tabelo 6.1) izboljša toplotno prevodnost PCB in tako omogoča bolj enakomeren temperaturni profil (deluje kot toplotni razpršilnik). Skupna debelina PCB je po novem znašala $1,5 \text{ mm}$, pri čemer sta bili plošči FR-4 debeli vsaka po $0,7 \text{ mm}$ in bakrena $0,1 \text{ mm}$, kar se približno sklada s standardno skupno debelino $1,57 \text{ mm}$ [46].

V vogale PCB smo dodali še bakrene vijake s premerom 2 mm , ki služijo namestitvi in povezavi PCB s sosednjimi komponentami.

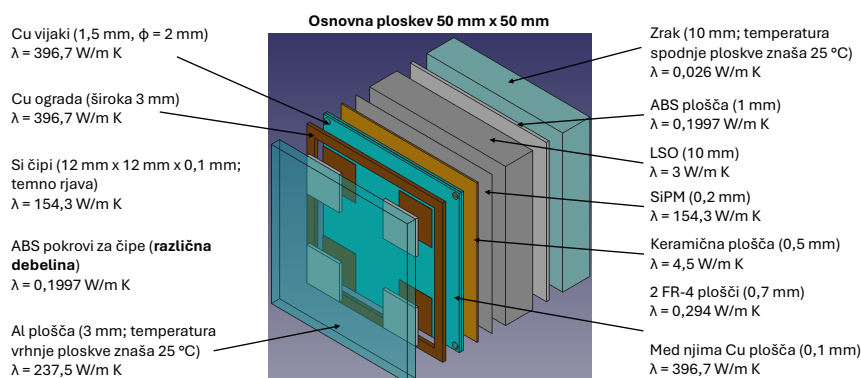
Zadnji dodatek je 3 mm široka bakrena ograda med PCB in aluminijasto ploščo, ki služi kot termični kontakt s toplotnim prevodnikom za hlajenje PCB. Njeno debelino smo prilagajali v skladu z debelino ABS pokrovov.

Pri geometriji na slikah 6.7 in 6.8 smo pod čipe postavili še $0,5 \text{ mm}$ debele keramične ploščice.

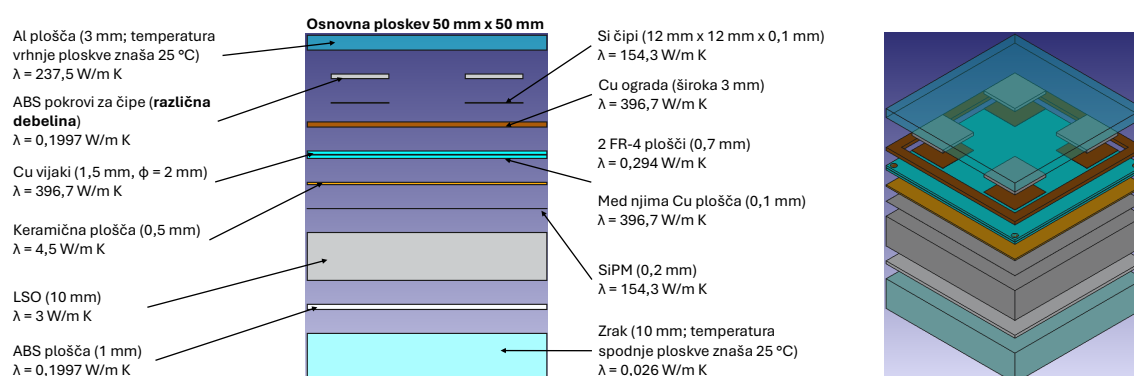
6.2. Vpliv debeline ABS pokrovov in keramike

Material, iz katerega so čipi, smo za te in vse nadaljnje simulacije spremenili iz Cu na Si.

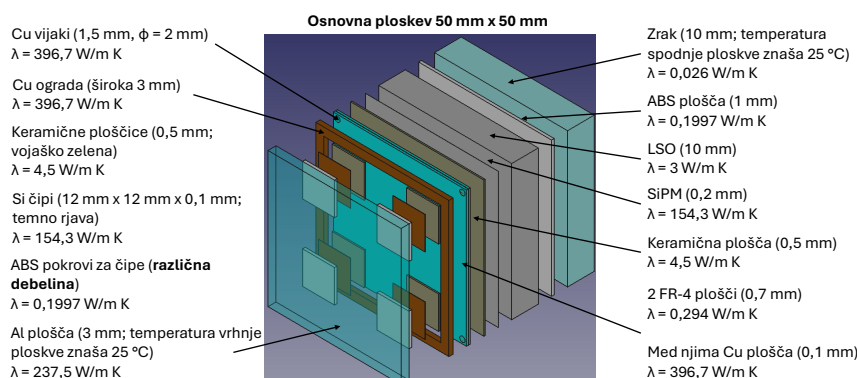
Posodobljen nabor materialov z lastnostmi je v tabeli 6.2, slika 6.9 pa prikazuje odvisnost maksimalne temperature na ravni čipov, maksimalne temperature na fotonski ravni in temperaturne razlike na fotonski ravni od debeline ABS pokrovov za obe geometriji.



Slika 6.5: Prikaz dograjene geometrije s pripadajočimi dimenzijami elementov in njihovimi toplotnimi prevodnostmi.

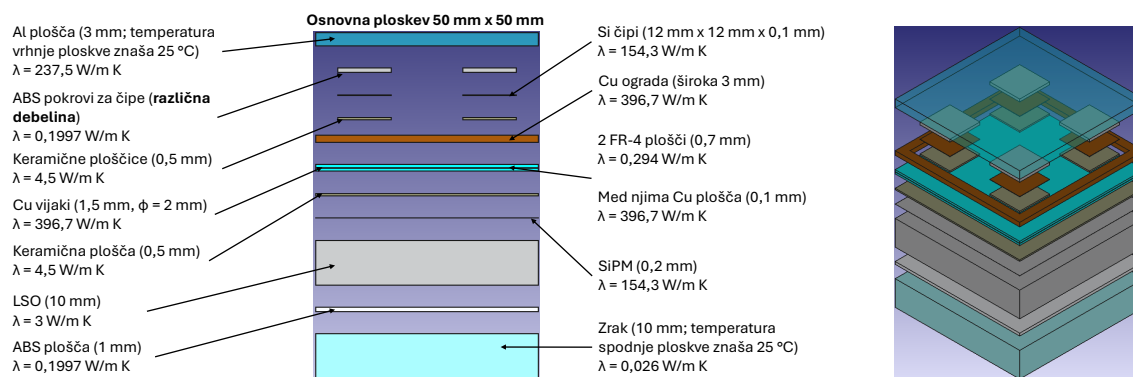


Slika 6.6: Stranski prikaz dograjene geometrije s pripadajočimi dimenzijami elementov in njihovimi toplotnimi prevodnostmi (levo) in prikaz tlorisa dograjene geometrije v izometrični projekciji (desno).



Slika 6.7: Prikaz dograjene geometrije ob dodatku keramike pod čipe s pripadajočimi dimenzijami elementov in njihovimi toplotnimi prevodnostmi.

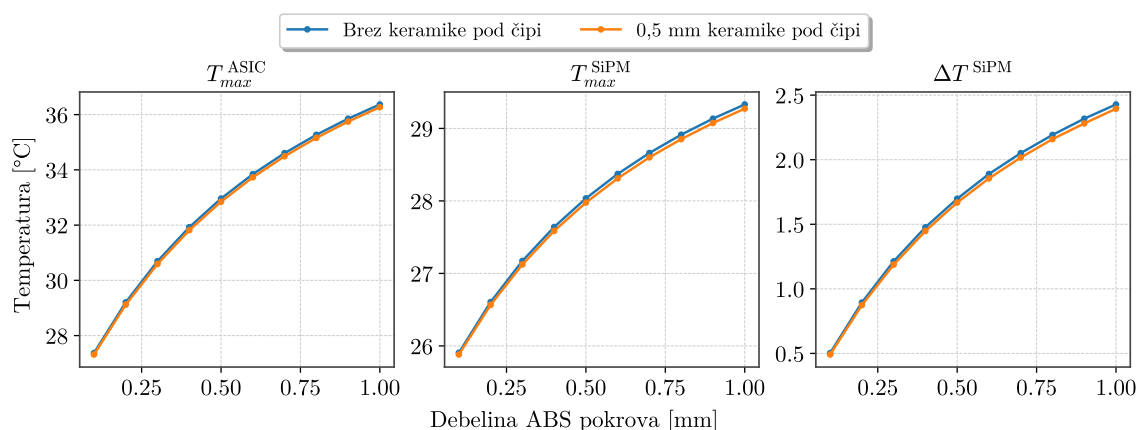
Poglavje 6. Rezultati



Slika 6.8: Stranski prikaz dograjene geometrije ob dodatku keramike pod čipe s pripadajočimi dimenzijami elementov in njihovimi toplotnimi prevodnostmi (levo) in prikaz tlorisa v izometrični projekciji (desno).

Tabela 6.2: Posodobljen prikaz za simulacijo pomembnih lastnosti uporabljenih materialov.

Material	$\rho \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$c_p \text{ [J/kg}\cdot\text{K]}$	$\lambda \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$
FR-4	1900	1150	0,294
Si	2329	695,1	154,3
Cu	8942	383,3	396,7
Al	2689	951	237,5
ABS	1030	1400	0,1997
Keramika	4900	800	4,5
LSO	7400	304,7	3
Zrak (25 °C)	1,161	1007	0,026

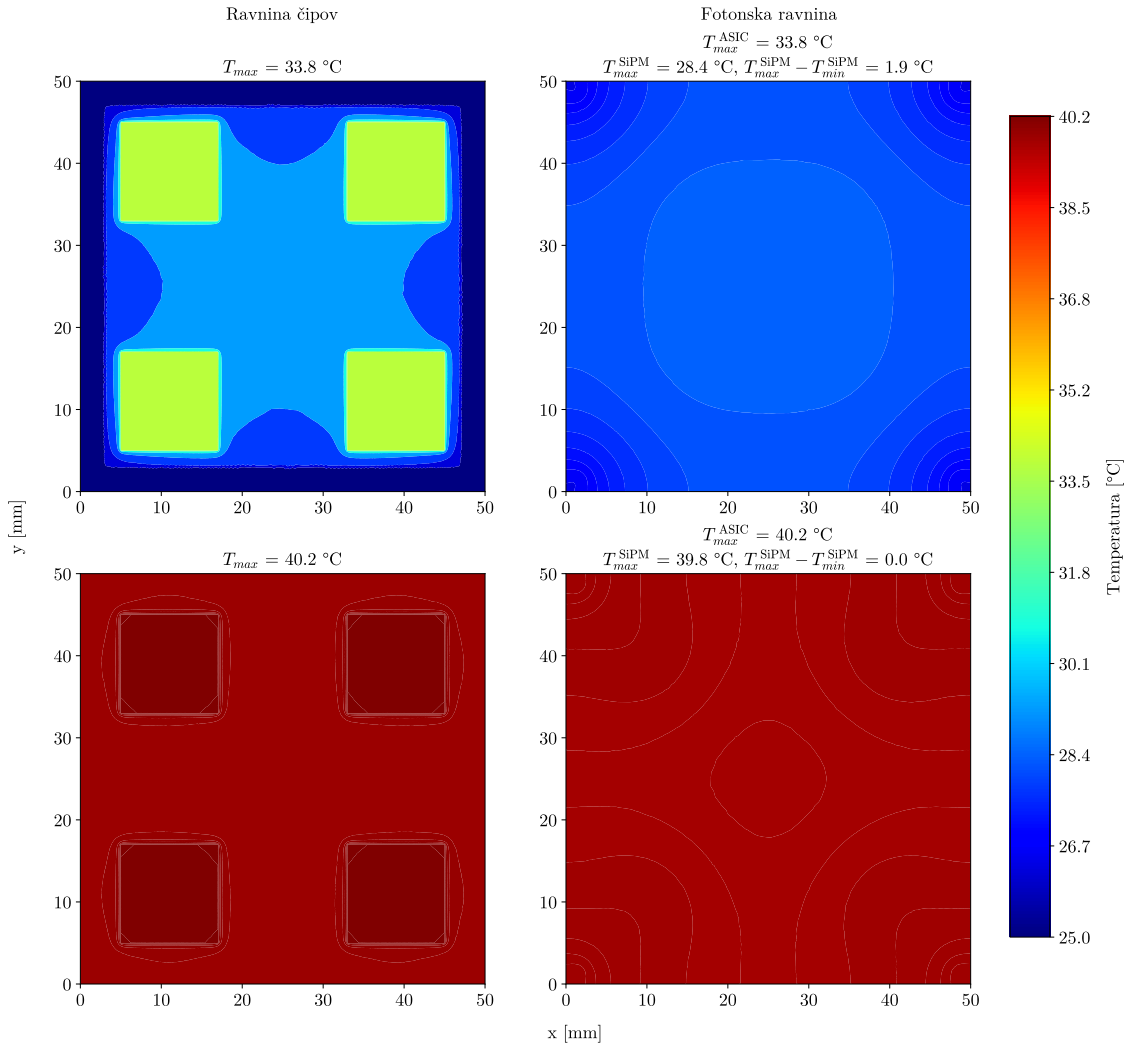


Slika 6.9: Prikaz odvisnosti maksimalne temperature na ravnini čipov, maksimalne temperature na fotonski ravnini in temperaturne razlike na fotonski ravnini od debeline ABS pokrovov za obe geometriji.

Vidimo, da z naraščajočo debelino pokrova naraščajo tudi temperature, kar je smiselno, saj ABS s svojo nizko toplotno prevodnostjo ($\lambda = 0,2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) med prevodnima Si in Al deluje kot toplotni upor in tako upočasnjuje odvajanje toplote v smeri navzgor. Keramika pod čipi glede na ostalo kompozicijo pod njimi očitno

tudi deluje kot upor, saj dobimo ob njeni prisotnosti malenkost nižje temperature. Maksimalna temperatura na ravnini čipov s povečevanjem debeline pokrova naraste s približno 27,5 °C na dobrih 36 °C, maksimalna temperatura na fotonski ravnini s slabih 26 °C na približno 29,3 °C, temperaturna razlika na fotonski ravnini pa z 0,5 °C na slabi 2,5 °C.

Preverimo še, če dodatek ograde res pripomore k nižjim temperaturam. Za primerjavo sta na sliki 6.10 prikazana para profilov za geometrijo brez keramike pod čipi pri debelini ABS 0,6 mm, ki smo jo kot najmanjšo za realen sistem dosegljivo uporabljali v nadaljnjih simulacijah.



Slika 6.10: Prikaz temperaturnih profilov z ogrado (zgoraj) in brez ograde (spodaj) za geometrijo brez keramike pod čipi pri debelini ABS pokrova 0,6 mm. Izpisani sta pripadajoči maksimalni temperaturi čipov in SiPM ter temperaturni razliki na fotonski ravnini.

Razlika je očitna že na pogled in o njej jasno pričajo tudi številske vrednosti – maksimalna temperatura na ravnini čipov ob odsotnosti ograde naraste za dobrih 6 °C, na fotonski ravnini pa za več kot 10 °C. CTR bi se v tem primeru poslabšal za slabi dve ps, DCR pa bi se več kot podvojil. Po drugi strani pa bi največja razlika med časovnimi ločljivostmi posameznih SiPM z 0,3 ps padla na zgolj 6,4 fs (glej

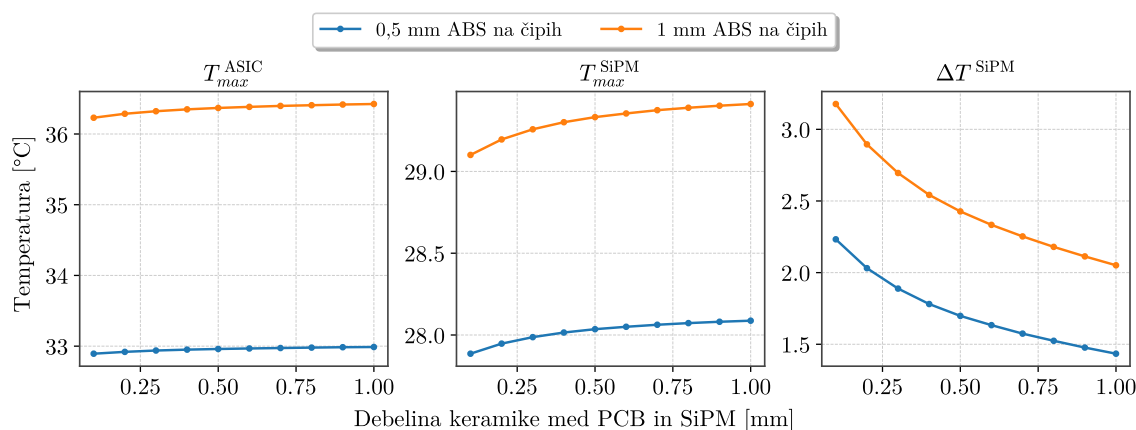
sliko 2.18).

Kompleten nabor primerjav temperatur za 0,6 mm ABS je v tabeli 6.3.

Tabela 6.3: Primerjava obravnavanih temperatur brez in z ogrado pri 0,6 mm ABS za obe geometriji.

	Brez keramike pod čipi			0,5 mm keramike pod čipi		
	T_{max}^{ASIC} [°C]	T_{max}^{SiPM} [°C]	ΔT^{SiPM} [°C]	T_{max}^{ASIC} [°C]	T_{max}^{SiPM} [°C]	ΔT^{SiPM} [°C]
Z ogrado	33,8	28,4	1,9	33,7	28,3	1,9
Brez ograde	40,2	39,8	0,04	40,2	39,8	0,04

Ker smo ugotovili, da so razlike v temperaturah med obema geometrijama zane-marljive, smo z ozirom na varčevanje z materialom raziskavo vpliva debeline kera-mike opravili na geometriji brez keramičnih ploščic pod čipi, pri čemer je debelina ABS pokrovov znašala 0,5 mm in 1 mm. Slika 6.11 prikazuje povzete rezultate.



Slika 6.11: Prikaz odvisnosti maksimalne temperature na ravni čipov, maksimalne temperature na fotonski ravni in temperaturne razlike na fotonski ravni od debeline keramike med PCB in SiPM za 0,5 mm in 1 mm debele ABS pokrove.

Vidimo, da debelina keramike na maksimalno temperaturo na ravni čipov prak-tično nima vpliva, ima pa šibek negativen vpliv na maksimalno temperaturo SiPM. Morda presenetljivo je odziv ΔT^{SiPM} ugoden – s povečevanjem debeline se lahko na-mreč toplota po plasteh keramike razporedi bolj enakomerno in tako tudi do SiPM dospe bolj enovit profil. Izboljšanje glede na mejni vrednosti debelin znaša približno 1,2 °C za 1 mm ABS in 0,8 °C za 0,5 mm ABS.

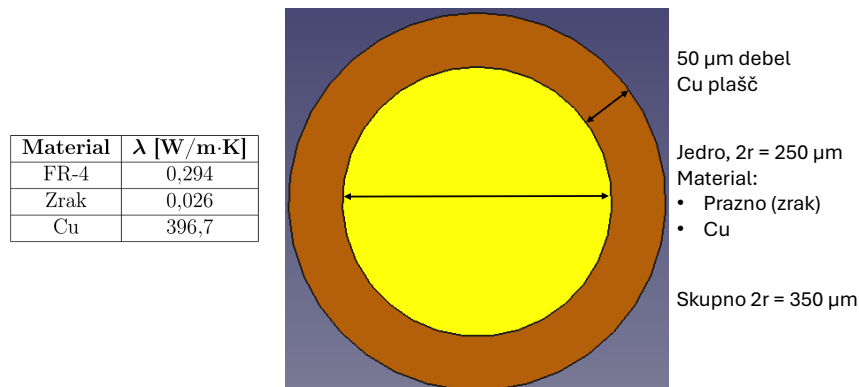
Mimogrede lahko pri debelini 0,5 mm rezultate primerjamo z ustreznimi točkami na sliki 6.9 in potrdimo, da so konsistentni.

6.3 Navpične električne povezave in vodno hlajenje

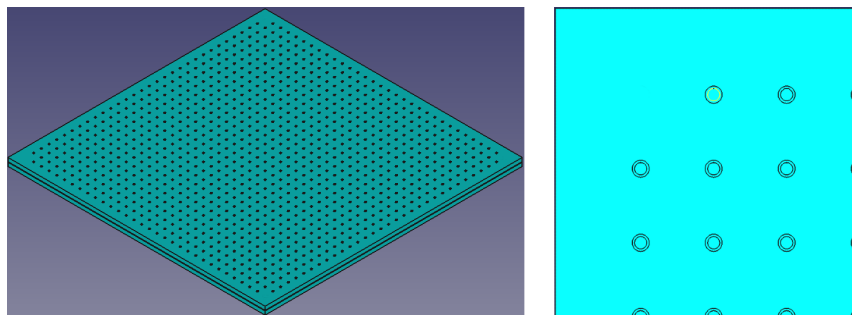
V nadaljevanju smo najprej želeli še dodatno izboljšati naš model PCB. Realne plošče s tiskanim vezjem namreč poleg večplastne sestave vsebujejo tudi navpične električne povezave – majhne izvrtane luknje, ki potekajo skozi dve ali več zapo-rednih plasti. Te luknje so prevlečene s tankim slojem električno prevodne kovine, navadno bakra, ki vzpostavi električno povezavo med (izolacijskimi) plastmi in tako omogoči prenos signalov in energije. Navpične električne povezave so v večplastnih

PCB še posebej pomembne zaradi dejstva, da so električni krogi posameznih plasti sicer drug od drugega neodvisni.

Modelirali smo jih kot 1,5 mm dolge valje s premerom 0,35 mm, pri čemer je 0,05 mm debel obod predstavljal bakren plašč, preostalih 0,25 mm pa jedro povezave, ki je bilo bodisi prazno (torej »sestavljeno« iz zraka) bodisi prav tako bakreno (slika 6.12). Po osnovni ploskvi PCB so bile razporejene simetrično s središčno razdaljo 1,5 mm, kar je na koncu pomenilo mrežo velikosti 32×32 (oz. natančneje 1020 povezav – ogliščne štiri smo zaradi prisotnosti vijakov odstranili; slika 6.13).



Slika 6.12: Prikaz in popis sestave navpične električne povezave s toplotnimi prevodnostmi relevantnih materialov.



Slika 6.13: Prikaz razporeditve navpičnih električnih povezav (levo) s približnim pogledom (desno). Ogliščne štiri smo zaradi prisotnosti vijakov odstranili.

Pri izdelovanju mreže za takšno sestavo pa smo naleteli na težavo, saj ima študentska verzija Fluent postavljen omejitev za številčnost mreže, ki znaša malce več kot 10^6 celic. Ni si težko predstavljati, da prisotnost 1020 drobnih elementov, ki zahtevajo precej fino mrežo, skokovito poveča število celic. Reševanja smo se lotili z odstranitvijo fizičnih povezav iz modela in določanjem efektivnih termičnih lastnosti posamezne plasti (torej dveh iz FR-4 in ene iz Cu) z uporabo približkov efektivnega medija (ang. *effective medium approximations*, EMA).

Efektivno gostoto smo preprosto izračunali iz lastnosti posameznih elementov, specifično toploto pa smo določili kot masno povprečje posameznih gradnikov, torej

$$c_p^{\text{eff}} = \frac{\sum_i m_i c_{p,i}}{\sum_i m_i}, \quad (6.1)$$

kjer indeks i pomeni FR-4, Cu in za prazno povezavo še zrak.

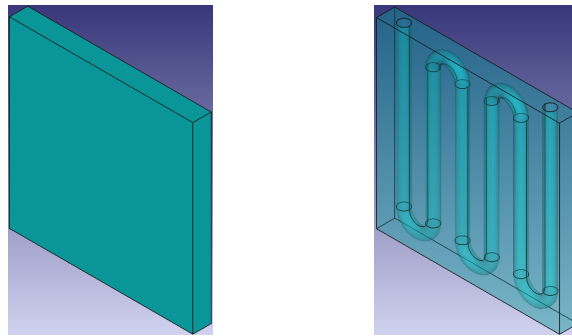
Večji izziv pa predstavlja toplotna prevodnost. Za izračun njene vrednosti v smeri osi $\pm z$ (torej med plastjo zraka in Al) lahko preprosto uporabimo koncept toplotnega upora in enačbe za prevajanje skozi več vzporednih plasti [47]. Za izračun ravninske vrednosti pa uporabimo Maxwelllov približek za kompozitne materiale z vključki

$$\lambda_{xy}^{\text{eff}} = \lambda_O \frac{2\lambda_O + \lambda_V + 2f(\lambda_V - \lambda_O)}{2\lambda_O + \lambda_V - f(\lambda_V - \lambda_O)}, \quad (6.2)$$

kjer je λ_O toplotna prevodnost osnove, λ_V toplotna prevodnost vključkov in f površinski delež vključkov [48]. Le-te v našem primeru predstavljajo navpične električne povezave, katerih efektivno toplotno prevodnost smo določili s približkom

$$\lambda_V = \frac{r_{\text{jedro}} + r_{\text{plašč}}}{\frac{r_{\text{jedro}}}{\lambda_{\text{jedro}}} + \frac{r_{\text{plašč}}}{\lambda_{\text{plašč}}}}. \quad (6.3)$$

Ker robni pogoj 25 °C na vrhnji ploskvi aluminijske plošče ni neposredno prenosljiv v realnost (ostaja vprašanje, *kako* poskrbeti za takšno temperaturo), smo začeli iskati zaključene hladilne rešitve. Ena možnost je izraba termoelektričnega pojava s Peltierjevimi elementi¹, ki pa zaradi potrebe po ločenem odvajanju izhodne toplote vsaj z energetskega stališča ni učinkovita. Ti elementi imajo namreč zelo nizke izkoristke, kar pomeni, da proizvajajo relativno velike količine odpadne toplote, ki jo je (poleg tiste proizvedene s strani elektronike v našem primeru) prav tako treba odvesti iz sistema. Zaradi tega smo se raje odločili za vodno hlajenje (z laminarnim tokom) in tako smo morali zanj prilagoditi geometrijo. Debelino Al plošče smo povečali na 5 mm in skozi njo speljali 3 mm široko pot za tok tekočine. Sprememba je prikazana na sliki 6.14.



Slika 6.14: Prikaz Al plošče za simulacije z robnim pogojem 25 °C na zgornji ploskvi (levo) in njene spremembe za vodno hlajenje (desno). Leva odprtina predstavlja pritok in desna odtok.

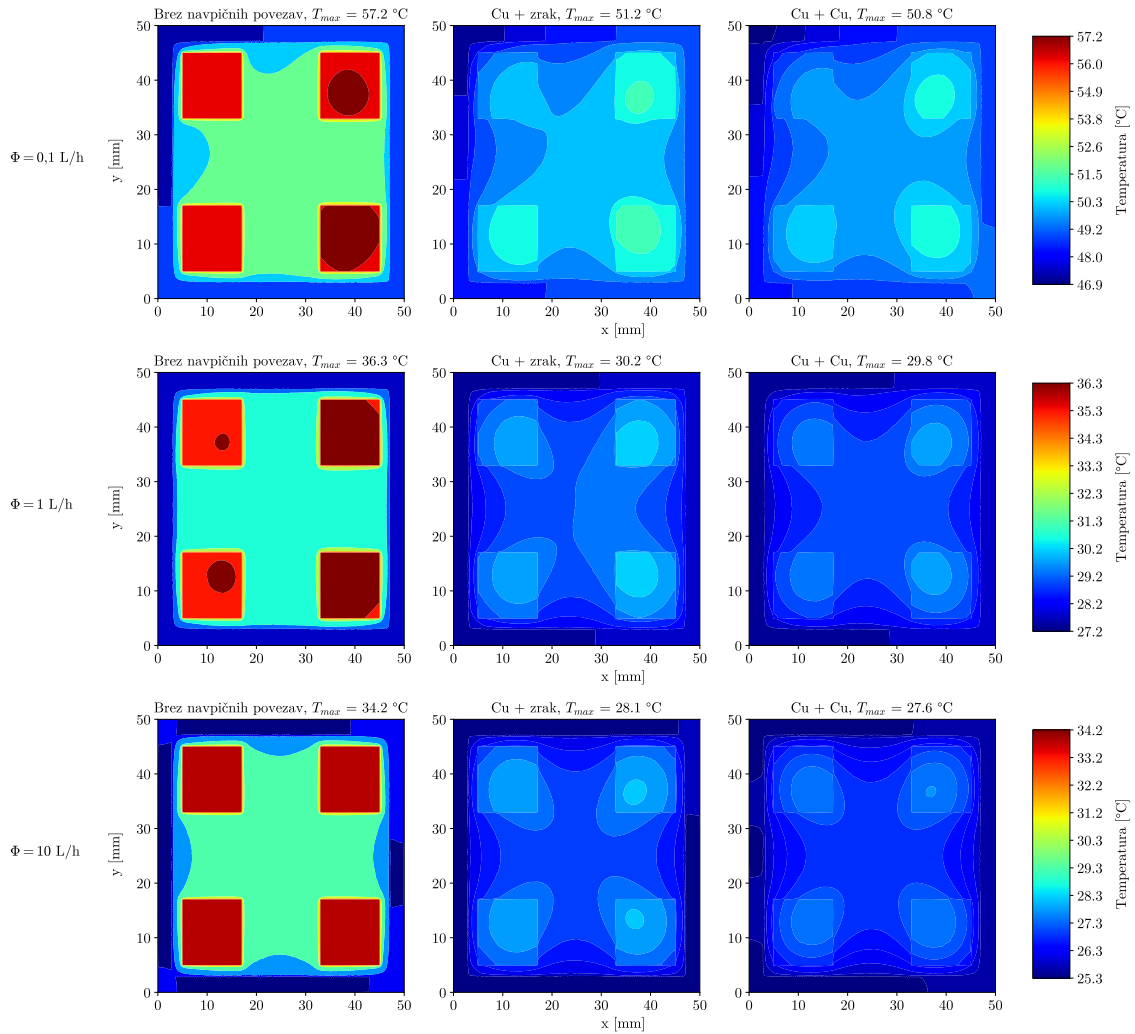
Za pridobitev občutka o razponih temperatur smo najprej simulirali prostorninski tok vode Φ velikosti 0,1 L/h, 1 L/h in 10 L/h z vstopno temperaturo 25 °C, pri čemer smo robni pogoj 25 °C na zgornji Al ploskvi seveda odstranili. Odstranili smo tudi keramiko med PCB in Si. Posodobljen nabor materialov z lastnostmi je v tabeli 6.4, prikaz temperaturnih profilov na ravnini čipov in fotonski ravnini za vse sestave navpičnih električnih povezav in vse tokove pa na slikah 6.15 in 6.16.

¹Z izrazom *termoelektrični pojav* označujemo skupek pojavov, pri katerih gre za neposredno pretvarjanje električne napetosti v temperaturno razliko ali obratno. Mednje spada tudi *Peltierjev pojav*, ko električni tok skozi sloja kovin ali polprevodnikov različnega tipa, staknjenih na dveh spojih, inducira toplotni tok. Posledično se ena plast hladi, medtem ko se druga segreva.

6.3. Navpične električne povezave in vodno hlajenje

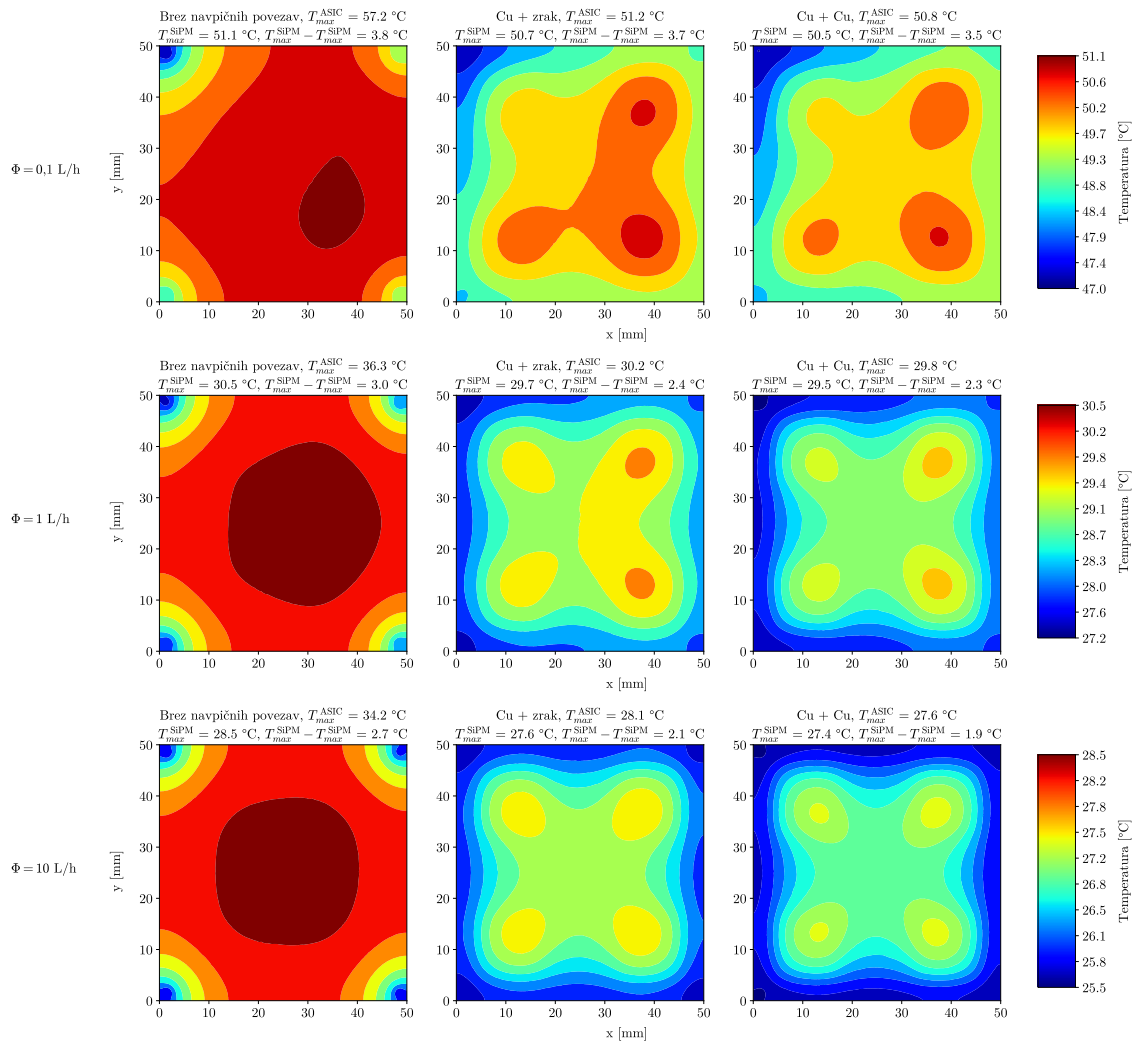
Tabela 6.4: Posodobljen prikaz za simulacijo pomembnih lastnosti uporabljenih materialov. Krepko so izpisane plasti PCB z efektivnimi lastnostmi, kjer »povezava zrak« pomeni prazno jedro navpične povezave, »povezava Cu« pa povezavo v celoti iz bakra.

Material	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kg·K]	λ_z [W/m·K]	λ_{xy} [W/m·K]
FR-4	1900	1150	0,294	0,294
Si	2329	695,1	154,3	154,3
Cu	8942	383,3	396,7	396,7
Al	2689	951	237,5	237,5
ABS	1030	1400	0,1997	0,1997
LSO	7400	304,7	3	3
Zrak (25 °C)	1,161	1007	0,026	0,026
H ₂ O	998,2	4182	0,6	0,6
FR-4 + povezava zrak	1997,8	1083,8	7,94	0,28
FR-4 + povezava Cu	2177,5	1025,9	15,91	0,33
Cu + povezava zrak	8762,2	383,3	388,7	384,8



Slika 6.15: Prikaz temperaturnega profila na ravnini čipov za $\Phi = 0,1 \text{ L/h}$ (vrh), $\Phi = 1 \text{ L/h}$ (sredina) in $\Phi = 10 \text{ L/h}$ (dno). Levo za primer brez navpičnih povezav, v sredini za prazne povezave in desno za povezave v celoti iz bakra.

Opazimo, da sta predvsem profila pri nižjih dveh vrednostih pretoka vidno nesimetrična, kar je posledica spremenljive temperature vode vzdolž njenega toka. Pri $\Phi = 10$ L/h pa je ta učinek že precej zabrisan. Prisotnost navpičnih povezav pri dani vrednosti pretoka zniža maksimalno temperaturo, pri čemer najboljše rezultate dobimo pri bakrenih povezavah. To je posledica močno povečane toplotne prevodnosti obeh plasti FR-4 zaradi dodatka bakra, katerega učinek prevlada tudi v primeru praznih povezav (glej vrednosti λ_z v tabeli 6.4). Le-te znižajo maksimalno temperaturo za približno 6 °C, izboljšanje v primeru bakrenih povezav pa znaša le še dodatne 0,4 °C. Tu lahko tudi bolj nazorno opazujemo vpliv bakrene ograde, ki je izrazit predvsem v primerih brez povezav – vidimo namreč oster rob najnižjih temperatur, ki ustreza položaju ograde. Kar se tiče splošnih sprememb temperature, dobimo pri prehodu iz $\Phi = (0,1 \rightarrow 1)$ L/h približno 21 °C nižje, ki pa se ob nadaljnjem povečanju pretoka za faktor 10 znižajo le še za dodatni 2 °C.



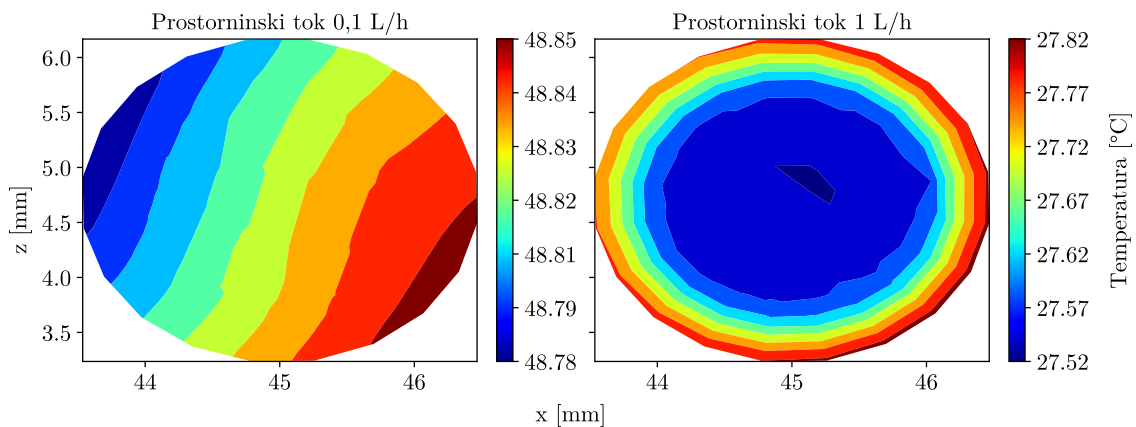
Slika 6.16: Prikaz temperaturnega profila na fotonski ravnini za $\Phi = 0,1$ L/h (vrh), $\Phi = 1$ L/h (sredina) in $\Phi = 10$ L/h (dno). Levo za primer brez povezav, v sredini za prazne povezave in desno za povezave v celoti iz bakra.

Tudi profili na fotonski ravnini so nesimetrični in tako kot pri profilih na ravnini čipov ta nesimetrija s povečevanjem pretoka izginja. Če smo na prejšnji sliki opazovali učinek ograde, pa lahko tu opazujemo učinek vijakov, ki je ponovno najbolj

izrazit v primerih brez navpičnih povezav – najnižje temperature so skoncentrirane v kotih, ki po položaju ustrezajo vijakom. Razlog za to je sledeč: močno prevodna bakrena plast na sredini PCB razširi toploto v ravninski smeri (deluje torej kot toplotni razpršilnik, kot smo omenili v razdelku 6.2), od katere je nezanemarljiv delež odpotuje do vijakov in nato po njih navzgor do ograde in naprej v Al ter vodo. Ker vijaki pošiljajo toploto v smeri navzgor, dobimo v kotih že omenjene hladne točke. Očitno je SiPM v našem modelu tudi dovolj tanek (0,2 mm), da se vstopna toplota v ravninski smeri še ne razširi dovolj, da bi se učinek z debelino zabrisal. S temperaturnega gledišča je takšna krožna zanka sicer ugodna, vprašanje pa je, v kolikšni meri, če sploh, bi do nje prišlo v resničnem sistemu. Še bolj nenavadno pa je, da se s povečevanjem prevodnosti povezav temperature na fotonski ravnini znižujejo – pričakovali bi prej obratno.

Spremembe pretoka nam v maksimumu prinesejo enake razlike kot na ravnini čipov – prvič za približno 21 °C in drugič za 2 °C, homogenost na fotonski ravnini pa se ob prvem prehodu izboljša za 0,8 °C (brez povezav) oz. 1,3 °C, ob drugem pa konsistentno za približno 0,3 °C. Prisotnost praznih povezav nam za $\Phi = 0,1$ L/h zniža maksimalno temperaturo za 0,4 °C in izboljša homogenost za 0,1 °C ter za $\Phi = 1$ L/h in 10 L/h zniža maksimalno temperaturo za 0,8 °C in izboljša homogenost za 0,6 °C. Bakrene povezave v vseh primerih prinesejo še dodatno izboljšavo 0,2 °C.

Za trenutek se ustavimo še ob opaženi nesimetriji. Čeprav je sama po sebi smiselna, pa je pri pretoku 0,1 L/h razporeditev vročih točk na osi odtoka (desna stran profilov) nenavadna – glede na geometrijo bi namreč pričakovali, da temperatura za ta odsek narašča v smeri navzgor. Razlago ponudi pogled na sliko 6.17, kjer vidimo, da se v primeru $\Phi = 0,1$ L/h temperaturni profil vse do odtoka ne razvije dokončno. Z ozirom na izbiro vodnega hlajenja kot energetske bolj ugodne rešitve od Peltierjevih elementov lahko zadovoljni opazimo, da že pri pretoku 1 L/h iz sistema odvajamo vodo pri maksimalni temperaturi le slabih 28 °C.



Slika 6.17: Prikaz temperaturnih profilov na odtoku za $\Phi = 0,1$ L/h (levo) in $\Phi = 1$ L/h (desno). Vidimo, da levi ni dokončno razvit.

6.3.1 Primerjava geometrij

Ob uvedbi vodnega hlajenja smo želeli tudi preveriti, kako bi določene nadaljnje spremembe oz. prilagoditve geometrije vplivale na temperature.

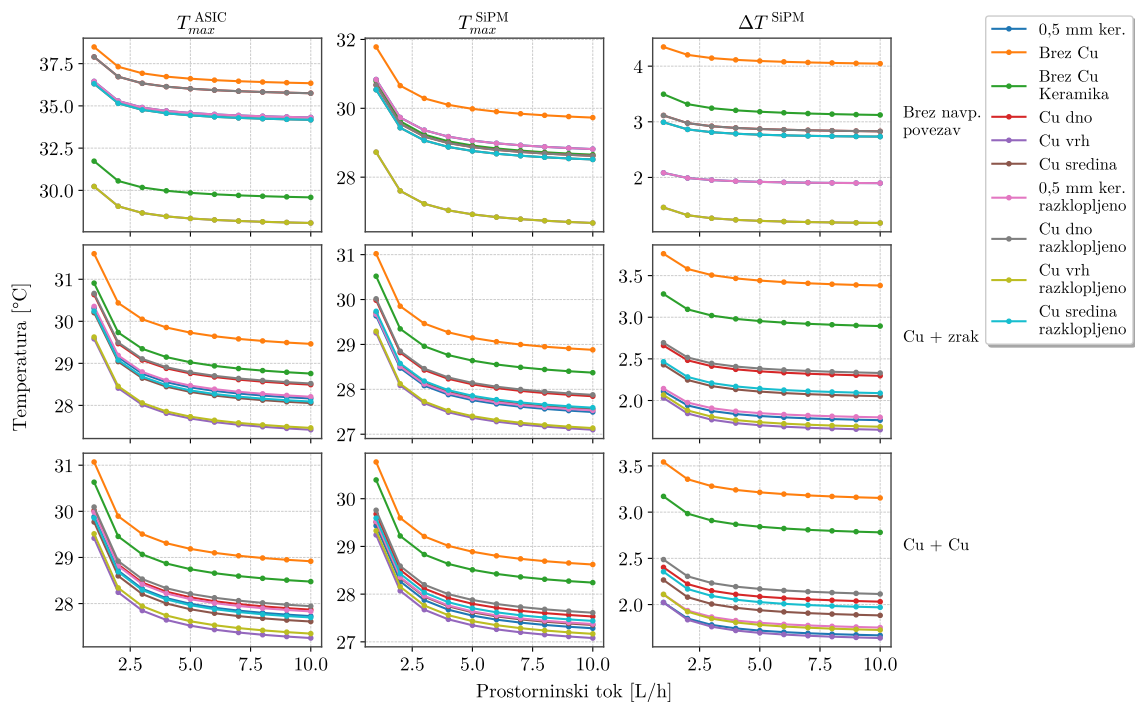
Najprej smo spreminjali položaj Cu plošče v PCB, in sicer smo jo s sredine premaknili na vrh in nato še na dno. Preizkusili smo tudi, kaj se zgodi, če Cu ploščo

odstranimo in celoten PCB simuliramo kot 1,5 mm FR-4. V naslednjem koraku smo le-tega spremenili še v keramiko. Zatem smo prvotni geometriji s Cu ploščo na sredini PCB dodali 0,5 mm keramike med PCB in SiPM. Zadnja prilagoditev pa je služila preverjanju sprememb ob razkloplitvi navpičnih povezav od Cu plošče v PCB. To smo storili tako, da smo povezave obdali z 0,05 mm debelim plaščem zraka in ta dodatek upoštevali v efektivnih lastnostih bakrene plasti PCB. Skupno smo torej primerjali 10 geometrij.

Posodobljen nabor materialov z lastnostmi je v tabeli 6.5, slika 6.18 pa prikazuje rezultate v obliki odvisnosti obravnavanih temperatur od prostorninskega toka velikosti od 1 L/h do 10 L/h za vse vrste navpičnih povezav.

Tabela 6.5: Posodobljen prikaz pomembnih lastnosti uporabljenih materialov.

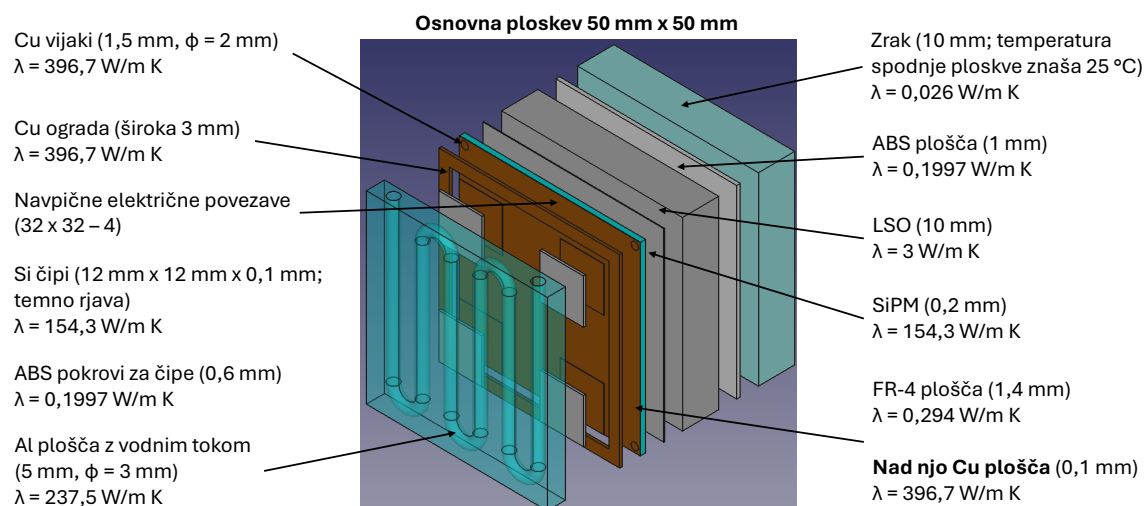
Material	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kg·K]	λ_z [W/m·K]	λ_{xy} [W/m·K]
FR-4	1900	1150	0,294	0,294
Si	2329	695,1	154,3	154,3
Cu	8942	383,3	396,7	396,7
Al	2689	951	237,5	237,5
ABS	1030	1400	0,1997	0,1997
Keramika	4900	800	4,5	4,5
LSO	7400	304,7	3	3
Zrak (25 °C)	1,161	1007	0,026	0,026
H ₂ O	998,2	4182	0,6	0,6
FR-4 + povezava zrak	1997,8	1083,8	7,94	0,28
FR-4 + povezava Cu	2177,5	1025,9	15,91	0,33
Cu + povezava zrak	8762,2	383,3	388,7	384,8
Keramika + via zrak	4780,1	788,3	11,87	4,2
Keramika + via Cu	4959,7	796,2	19,84	5,0
Cu + via zrak – razklopljeno	8558,6	386,4	378,5	362,8
Cu + via Cu – razklopljeno	8738,7	399,2	386,5	370,8



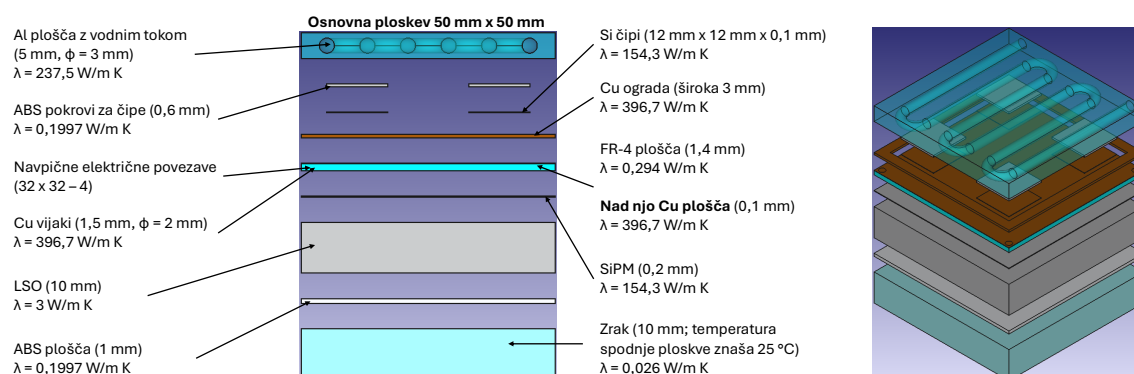
Slika 6.18: Prikaz odvisnosti T_{max}^{ASIC} , T_{max}^{SiPM} in ΔT^{SiPM} od prostorninskega toka za vse geometrije in vrste povezav.

6.3. Navpične električne povezave in vodno hlajenje

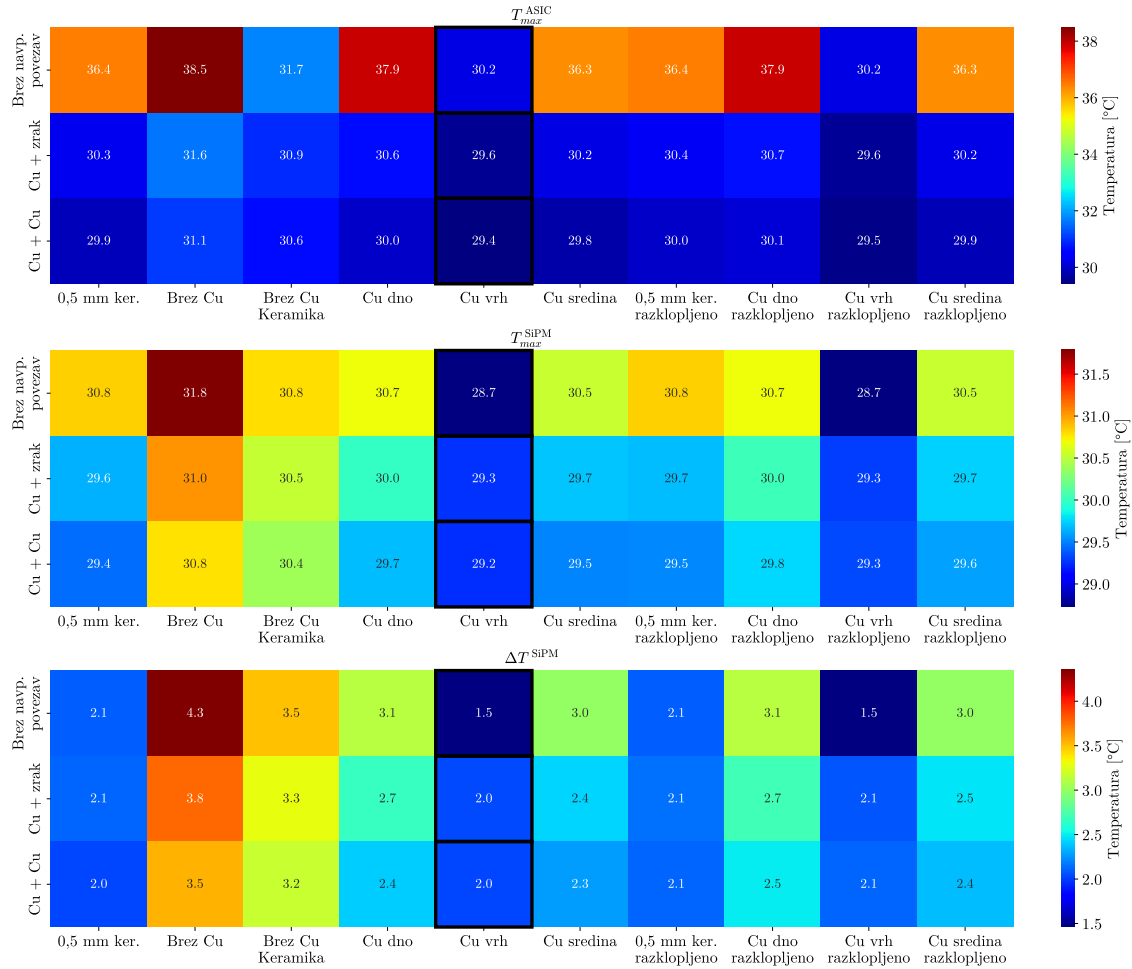
Vidimo, da je skozi vse primere konsistentno najboljša izbira geometrija z bakreno ploščo na vrhu PCB in sklopljenimi povezavami. Prikazana je na slikah 6.19 in 6.20, za lažjo nadaljnjo obravnavo rezultatov pa si oglejmo matriko temperatur za $\Phi = 1 \text{ L/h}$ na sliki 6.21.



Slika 6.19: Prikaz s stališča temperatur najboljše geometrije s pripadajočimi dimenzijami elementov in njihovimi toplotnimi prevodnostmi.



Slika 6.20: Stranski prikaz s stališča temperatur najboljše geometrije s pripadajočimi dimenzijami elementov in njihovimi toplotnimi prevodnostmi (levo) in prikaz tlorisa v izometrični projekciji (desno).



Slika 6.21: Matrični prikaz vrednosti T_{max}^{ASIC} , T_{max}^{SiPM} in ΔT^{SiPM} pri $\Phi = 1$ L/h za vse geometrije in vrste povezav. Črn pravokotnik označuje minimalno vrednost obravnavane temperature pri dani sestavi povezave.

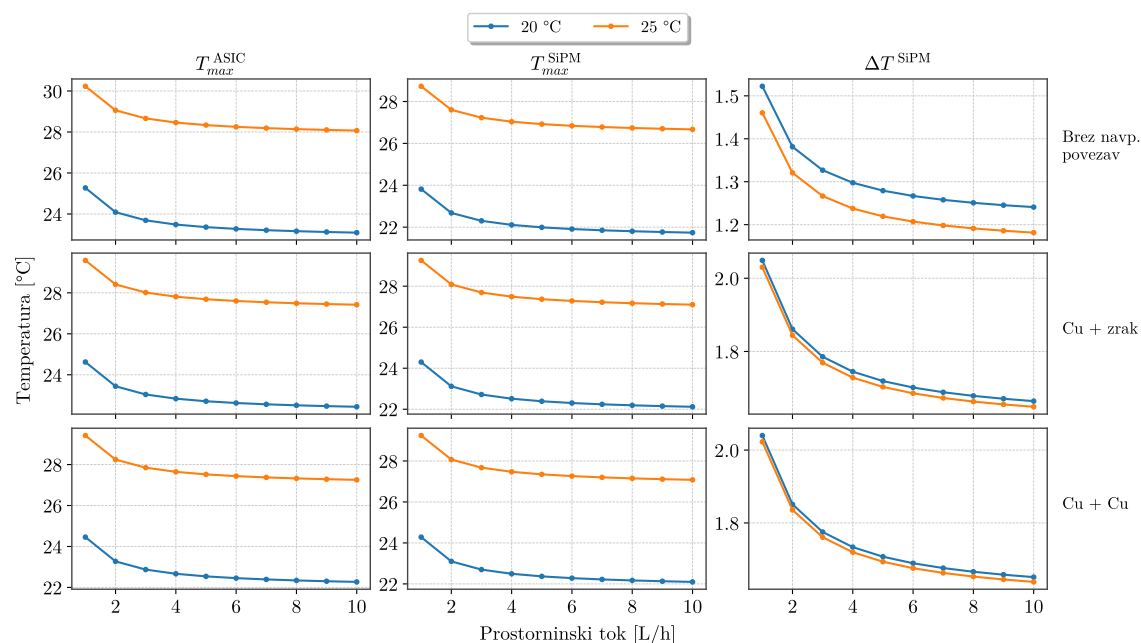
Najprej dobimo potrditev, da je prej omenjena geometrija res najboljša izbira, pričakovano pa se najslabše odzivata sestavi brez bakrene plošče. Vidimo tudi, da so razlike med sklopljenimi in nesklopljenimi primeri v našem modelu minimalne oz. zanemarljive.

Kar se tiče spreminjanja temperatur s prisotnostjo oz. prevodnostjo povezav, maksimalna temperatura na ravnini čipov za vse primere pada, kar je, kot že rečeno, posledica povečane prevodnosti plasti FR-4 v smeri osi z . Temperaturi v povezavi s SiPM s povezavami prav tako padata za vse primere, razen za geometrijo z bakrom na vrhu. Tako na sliki 6.18 kot na sliki 6.21 lahko tudi vidimo, da položaj bakrene plošče v PCB pomembno vpliva na temperature, pri čemer je najslabša izbira bakrena plošča na dnu. Očitno se dogaja naslednje: bakrena plošča res razširi toploto v ravninski smeri in velik del le-te po vijakih odpotuje nazaj navzgor. Ker se v primeru njenega položaja na vrhu to zgodi tik pod čipi, preostala plast FR-4 s slabo ravninsko prevodnostjo ob prisotnosti povezav veliko večino toplote pošlje navzdol proti SiPM. Ta učinek se z večjo prevodnostjo povezav poveča. Ko je Cu plošča na sredini PCB, ni v neposredni bližini čipov in je hkrati bližje SiPM, zaradi česar manj toplote pošlje po vijakih navzgor in več v smeri navzdol. Pri Cu plošči na dnu pa se ta učinek še poveča, saj je v neposrednem stiku s SiPM. Glede učinka povezav pa se

zdi, da z večjim deležem bakra izrazito močnejše širijo toploto v ravninski smeri, pri čemer dobimo pri geometriji z bakreno ploščo na vrhu intuitiven učinek prav zaradi dejstva, da plošča vso dodatno širitev po ravnini opravi tik pod čipi. Tam namreč toplota nikakor ne more po vijakih steči navzgor. Povsem možno pa je tudi, da je takšno obnašanje posledica še neke dodatne oz. druge, kompleksnejše kombinacije vplivov, ki je nismo uspeli prepoznati.

6.3.2 Vpliv temperature vhodne vode

Po določitvi najboljše geometrije smo na njej testirali vpliv temperature vhodne vode, in sicer smo le-to postavili na 20 °C. Rezultati so na sliki 6.22.



Slika 6.22: Prikaz odvisnosti $T_{ASIC_{max}}$, $T_{SiPM_{max}}$ in ΔT_{SiPM} od prostorninskega toka za najboljšo geometrijo pri temperaturi vhodne vode 20 °C in 25 °C za vse vrste povezav.

Vidimo, da ohladitev vhodne vode za 5 °C prinese enako znižanje maksimalnih temperatur in s tem za 0,8 ps boljšo časovno ločljivost. Zanimivo pa je, da toplejša vhodna voda vodi v bolj homogen temperaturni profil na fotonski ravnini. Se pa ta učinek zares pozna le v primeru brez povezav, kjer odstopanje znaša približno 0,6 °C. Največja razlika v CTR posameznih SiPM bi se v tem primeru izboljšala za 0,1 ps.

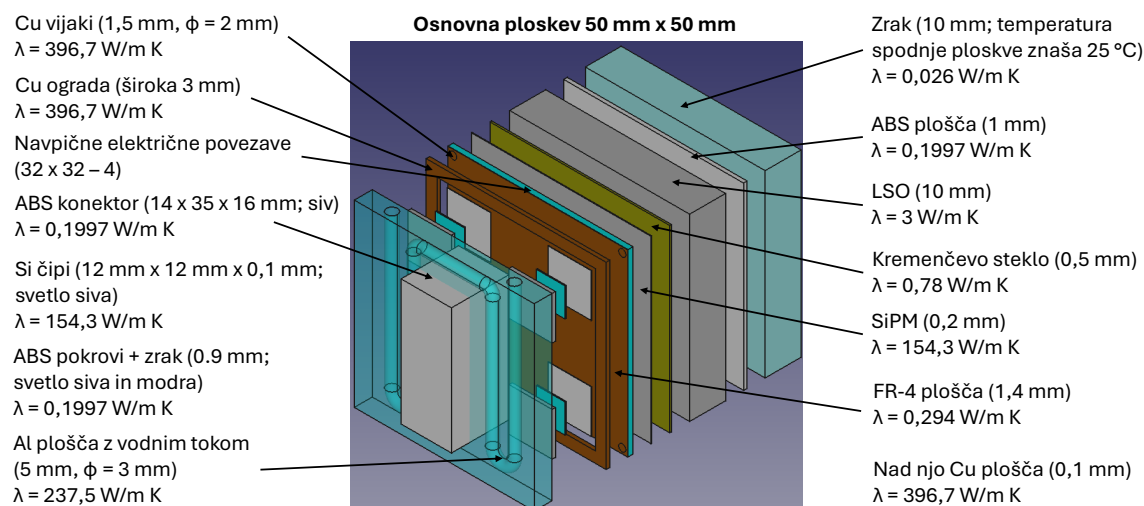
6.4 Lastno gretje SiPM

V naslednjem koraku smo želeli preveriti, kako se SiPM in celoten senzorski modul v našem modelu odzivata na njeno lastno gretje. Raziskavo smo opravili na končni geometriji, ki glede na prejšnjo vsebuje kar nekaj novosti.

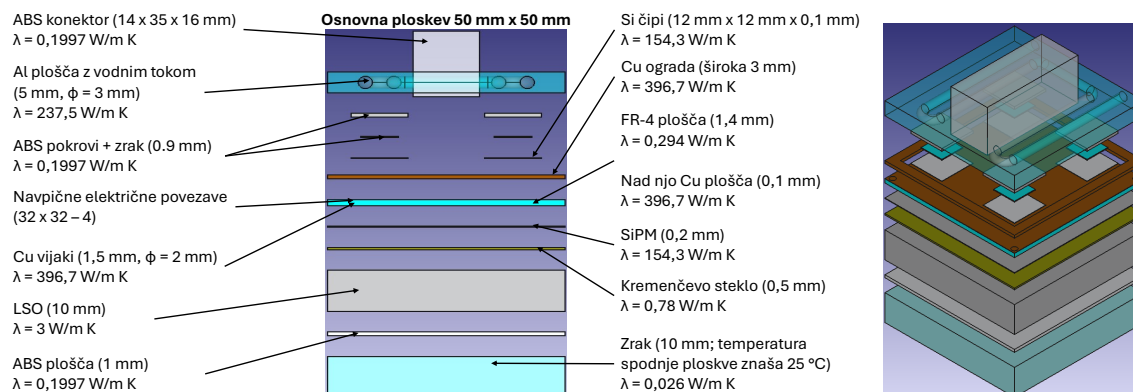
Prva je dodatek 0,5 mm debelega kremenčevega stekla med SiPM in LSO, ki služi kot svetlobno minimalno odbojna zaščitna plast za SiPM. Spremenili smo tudi ABS pokrove za čipe, in sicer smo njihovo debelino povečali na 0,9 mm in jim 2 mm od roba izrezali ploskev dimenzij 8 mm × 8 mm × 0,3 mm, ki je predstavljala zrak med pokrovom in čipom. Seveda smo v skladu s tem prilagodili debelino bakrene

Poglavje 6. Rezultati

ograde. Na koncu smo na ravnino čipov dodali konektor iz plastike ABS v obliki kvadra dimenzij $14\text{ mm} \times 35\text{ mm} \times 16\text{ mm}$, ki služi povezavi modula s preostalim delom detektorskega sistema. Zaradi njegove višine smo morali še prilagoditi pot vodnega toka skozi vrhno ploščo. Celotna geometrija s pripadajočimi dimenzijami elementov in njihovimi toplotnimi prevodnostmi je prikazana na slikah 6.23 in 6.24.



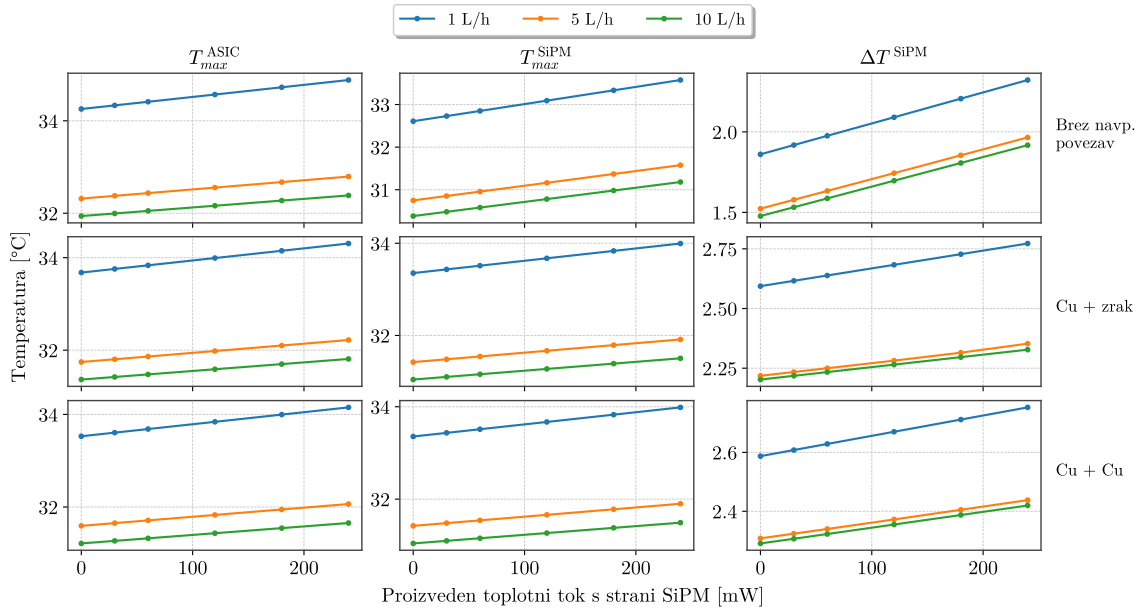
Slika 6.23: Prikaz končne geometrije s pripadajočimi dimenzijami elementov in njihovimi toplotnimi prevodnostmi.



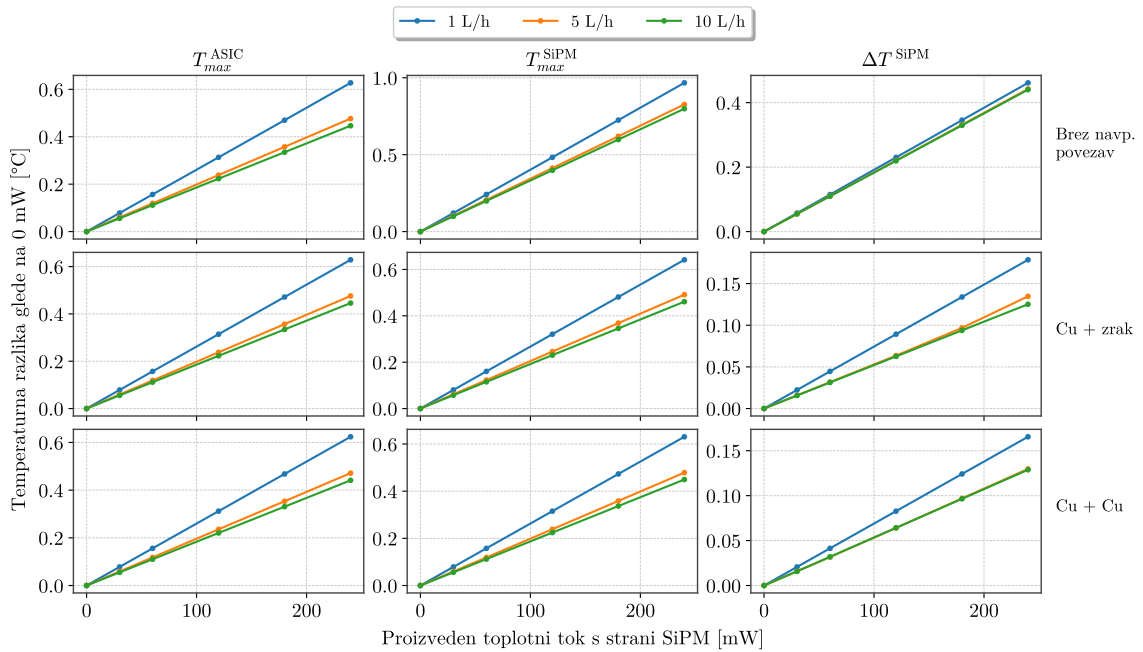
Slika 6.24: Stranski prikaz končne geometrije s pripadajočimi dimenzijami elementov in njihovimi toplotnimi prevodnostmi (levo) in prikaz tlorisa v izometrični projekciji (desno).

Lastno gretje smo simulirali v obliki SiPM kot vira toplotnega toka velikosti 30, 60, 120, 180 in 240 mW. Za malenkost bolj podobno okolje za primerjavo z rezultati iz [25] in [26] smo material plošče z vodnim tokom spremenili iz Al v keramiko.

Slika 6.25 prikazuje spreminjanje T_{max}^{ASIC} , T_{max}^{SiPM} in ΔT^{SiPM} s proizvedenim toplotnim tokom s strani SiPM, slika 6.26 pa spremembo teh temperatur glede na tiste pri odsotnosti lastnega gretja. Simulirali smo pri vseh do sedaj obravnavanih vrednostih prostorninskega toka, na slikah pa so za potrebe preglednosti izrisani le rezultati pri 1 L/h, 5 L/h in 10 L/h.



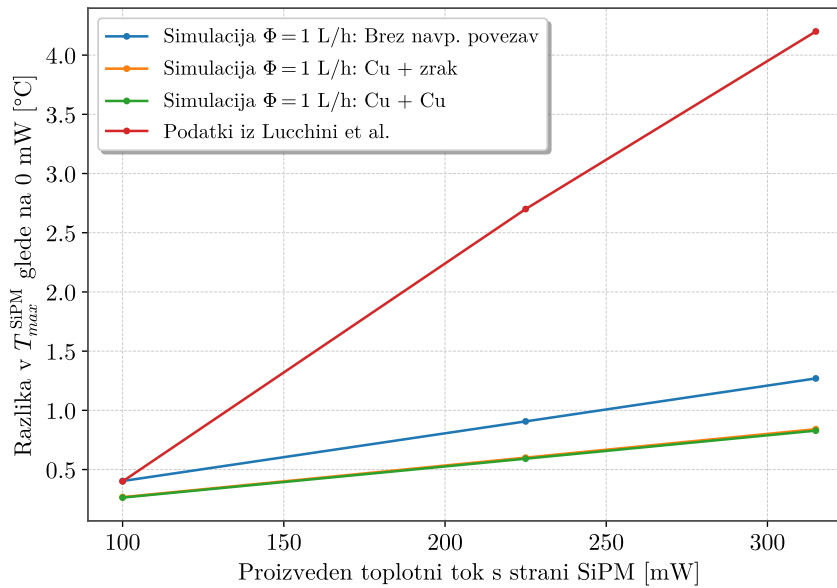
Slika 6.25: Prikaz odvisnosti T_{max}^{ASIC} , T_{max}^{SiPM} in ΔT^{SiPM} od proizvedenega toplotnega toka s strani SiPM za vse vrste povezav pri $\Phi = 1, 5$ in 10 L/h.



Slika 6.26: Prikaz odvisnosti spremembe T_{max}^{ASIC} , T_{max}^{SiPM} in ΔT^{SiPM} glede na referenčno vrednost pri 0 W od proizvedenega toplotnega toka s strani SiPM za vse vrste povezav pri $\Phi = 1, 5$ in 10 L/h.

Vidimo, da je naraščanje temperature s proizvedenim toplotnim tokom SiPM linearno, kar se sklada z eksperimentalnimi ugotovitvami iz [25] in [26]. Relativno povišanje temperature z naraščajočim prostorninskim tokom smiselno pada in je pri 5 L/h in 10 L/h že skorajda enako.

Za primerjavo z eksperimentalno pridobljenimi vrednostmi si oglejmo sliko 6.27 in tabelo 6.6.



Slika 6.27: Prikaz odvisnosti spremembe temperature SiPM glede na referenčno vrednost pri 0 W od proizvedenega toplotnega toka. Podatki iz naših simulacij so maksimalne temperature SiPM pri pretoku 1 L/h, pridobljene s prilagajanjem premice. Podatki iz [25] so vzeti za primer BT81 s SiPM proizvajalca Hamamatsu v keramičnem pakiranju, s termalno pasto vezanem na Cu ploščo, in z vklopljenim ventilatorjem za boljše odvajanje toplote.

Tabela 6.6: Primerjava spremembe temperature SiPM glede na referenčno vrednost pri 0 W za 50 mW proizvedenega toplotnega toka. Eksperimentalni podatki so iz [26], naši pa so ponovno pridobljeni s prilagajanjem premice.

Primer			Sprememba temperature SiPM [°C]
Vzorec	Substrat	Debelina POM [mm]	
KETEK	Al ₂ O ₃	0	0,2
KETEK	Al ₂ O ₃	1,5	2,0
HPK	Al ₂ O ₃	0	1,5
HPK	Al ₂ O ₃	1,5	3,0
HPK	PCB	0	3,0
HPK	PCB	1,5	4,2
Simulacija $\Phi = 1$ L/h: Brez navpičnih povezav			0,2
Simulacija $\Phi = 1$ L/h: Cu + zrak			0,13
Simulacija $\Phi = 1$ L/h: Cu + Cu			0,13

Vidimo, da se pri 100 mW in 50 mW naši podatki za primer brez povezav odlično ujemajo s tistimi iz [25] in s prvim primerom iz [26] ter da so si za povezave vrednosti približno podobne. Pri močnejših gretjih oz. za ostale primere iz [26] pa v našem modelu dobimo mnogo nižje vrednosti. Pri višjih stopnjah pretoka bi bila odstopanja samo še večja.

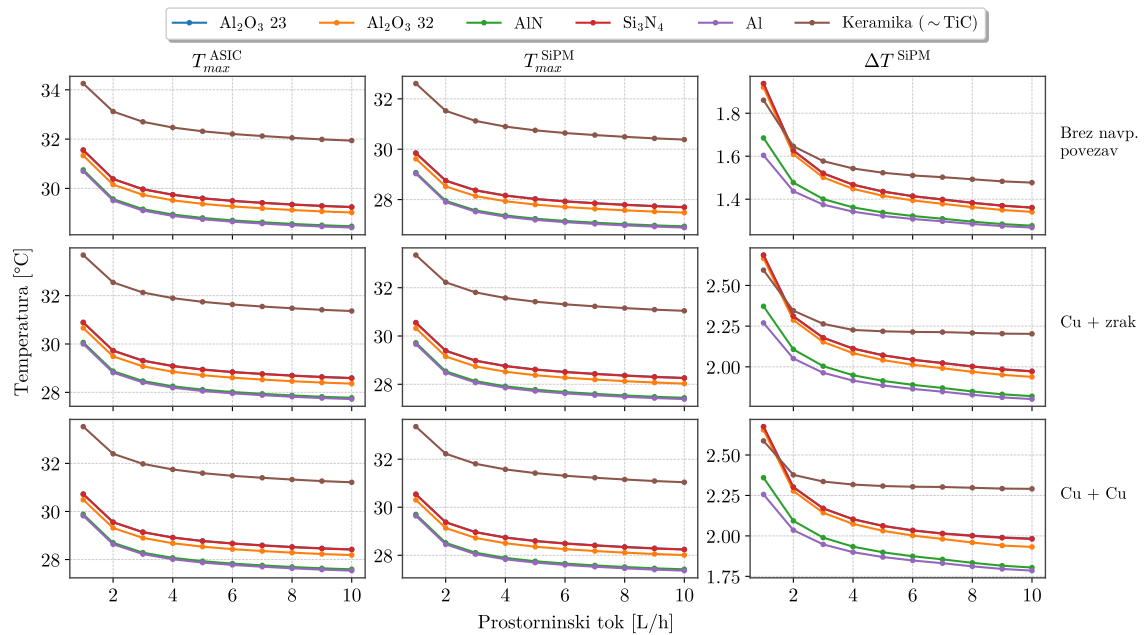
Vsekakor lahko zaključimo, da za naš modul morebitno lastno gretje SiPM ne predstavlja težave, saj v sistemih za PET fotopomnoževalke niso izpostavljene kakšnim ekstremnim razmeram. Celo v izrazito pesimistični in precenjeni situaciji s 100 mW toplotnega toka dobimo za najslabši primer brez povezav s pretokom $\Phi = 1$ L/h dvig maksimalnih temperatur pod $0,5^\circ\text{C}$ (ter s tem poslabšanje CTR pod 0,8 ps) in poslabšanje homogenosti na fotoniki ravni okrog $0,2^\circ\text{C}$ (kar prinese 0,03 ps slabšo največjo razliko v ločljivostih posameznih SiPM). Spomnimo tudi, da je bila v teh simulacijah plošča za vodno hlajenje narejena iz keramike, ki je v primerjavi z Al precej slabši prevodnik.

6.5 Vpliv materiala plošče z vodnim tokom

Čeprav je aluminij odličen toplotni prevodnik, pa je kot material za izdelavo ali 3D tisk takšnih struktur, kot je naša plošča za vodno hlajenje, dokaj drag. Po drugi strani pa obstaja mnogo vrst keramike, ki so s stališča prevajanja toplote solidne in celo konkurenčne čistemu Al, ter cenovno precej ugodnejše. Izbor tistih, s katerimi smo izvedli simulacije, je v tabeli 6.7, rezultati pa so prikazani na sliki 6.28.

Tabela 6.7: Prikaz lastnosti keramik, uporabljenih v simulacijah, skupaj z Al in do sedaj uporabljano keramiko iz [49], katere lastnosti najboljše ustrezajo titanovemu karbidu (TiC).

Material	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kg·K]	λ_z [W/m·K]
Al	2689	951	237.5
AlN	3220	740	163.1
Al ₂ O ₃ 32	3990	880	32
Si ₃ N ₄	3220	700	23.6
Al ₂ O ₃ 23	3900	880	23.3
Keramika (~ TiC)	4900	800	4.5

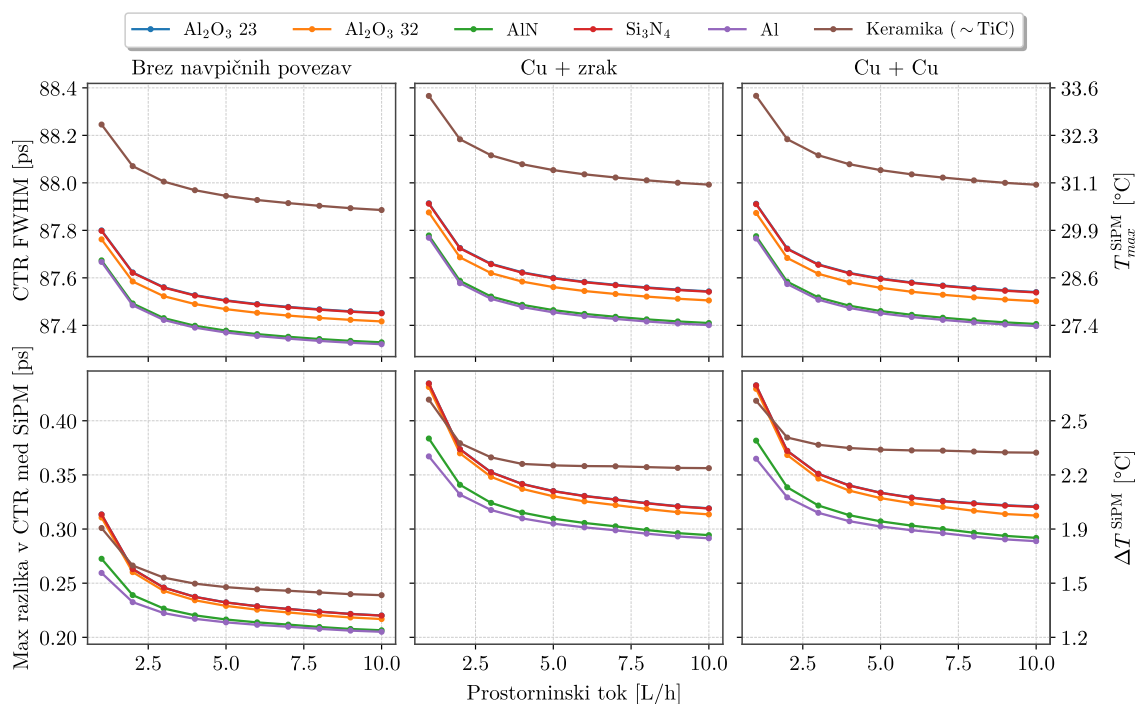


Slika 6.28: Prikaz odvisnosti T_{max}^{ASIC} , T_{max}^{SiPM} in ΔT^{SiPM} od prostorninskega toka za vse vrste povezav in vse materiale iz tabele 6.7.

Vidimo, da se temperature z naraščajočo toplotno prevodnostjo izboljšujejo, kar je seveda smiselno. V maksimalnih temperaturah dobimo s preходом iz TiC v Al_2O_3 izboljšavo približno $2,5\text{ }^\circ\text{C}$, nadaljnji prehod v AlN oz. Al pa to izboljša še za slabo stopinjo. Vidimo, da med AlN in Al praktično ni razlike, čeprav se po prevodnosti razlikujeta za $75\text{ W/m}\cdot\text{K}$.

Homogenost temperature na SiPM seveda pokaže manjše razlike. Za obravnavane pretoke lahko s preходом na Al_2O_3 oz. Si_3N_4 za primer brez povezav dobimo izboljšanje približno $0,15\text{ }^\circ\text{C}$ in za primer s povezavami od $0,25\text{ }^\circ\text{C}$ do $0,3\text{ }^\circ\text{C}$, s preходом na AlN oz. Al pa približno dvakrat toliko. Zanimivo je opaziti, da razlika med TiC in Al_2O_3 oz. Si_3N_4 s povečevanjem pretoka narašča, medtem ko se za AlN in Al zmanjšuje. Krivulje za Al_2O_3 23 se praktično popolnoma prekrijejo s tistimi za Si_3N_4 , kar je verjetno posledica zanemarljivih razlik med njunima toplotnima prevodnostma.

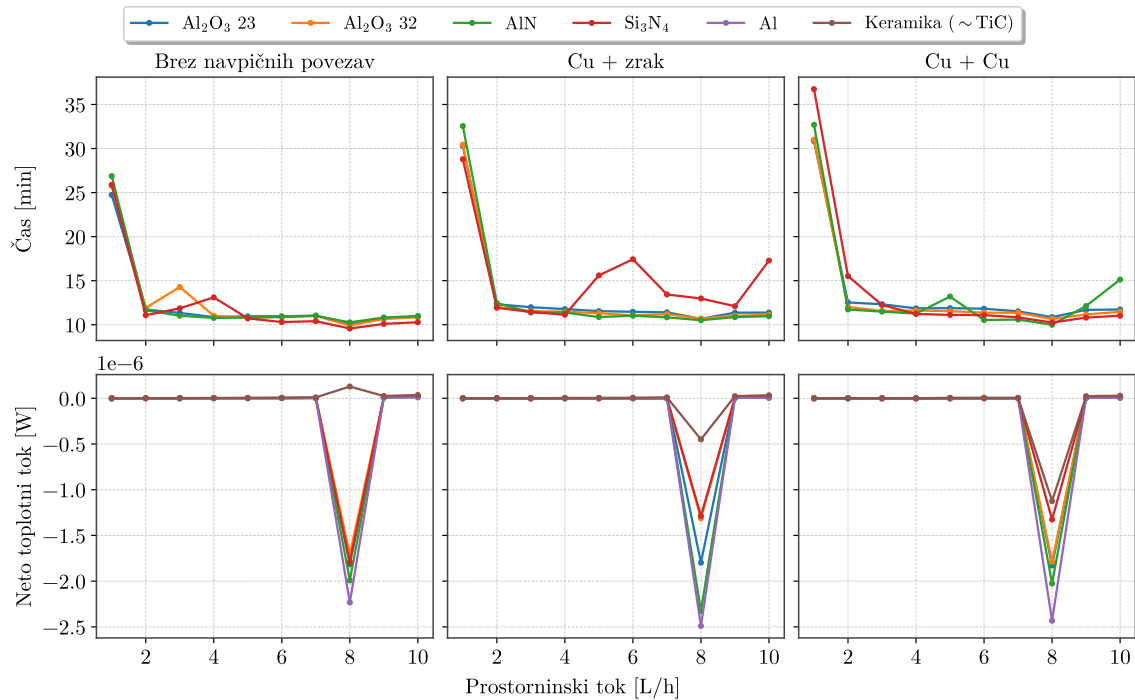
Na sliki 6.29 si oglejmo še ocene CTR na podlagi slike 2.18.



Slika 6.29: Prikaz odvisnosti ocen CTR na podlagi slike 2.18 od prostorninskega toka za vse vrste povezav in vse materiale iz tabele 6.7. Dodatno so na desni prikazane še temperaturne skale.

Vidimo, da se vrednosti CTR gibljejo med $87,3\text{ ps}$ in $88,4\text{ ps}$, največje razlike v ločljivostih pa med $0,2\text{ ps}$ in $0,5\text{ ps}$. Najboljša in najslabša ločljivost po vrstah keramike se razlikujeta za približno $0,6\text{ ps}$, največji razliki pa za približno $0,04\text{ ps}$ v primeru brez povezav in $0,08\text{ ps}$ v primerih s povezavami. Prehod iz 1 L/h na 10 L/h prinese približno $0,4\text{ ps}$ izboljšanje v CTR in $0,075\text{ ps}$ izboljšanje v največji razliki CTR med SiPM.

Kot zanimivost si lahko na sliki 6.30 ogledamo še čase trajanja posamezne simulacije in dosežene stopnje konvergence v obliki razlike med vhodnim in izhodnim toplotnim tokom po 400 iteracijah.



Slika 6.30: Prikaz odvisnosti trajanja simulacije in stopnje konvergence od prostorninskega toka po 400 iteracijah za vse vrste povezav in vse materiale iz tabele 6.7. Časi trajanja za TiC in Al niso izrisani, ker jih ob izvajanju teh simulacij še nismo merili.

Vidimo, da simulacije pri 1 L/h trajajo med 25 in 37 minut, približno dvakrat do trikrat dlje kot za ostale tokove, kjer se čas ustali na 11 oz. 12 minutah. Povsem možno je, da so vsaj nekateri vrhovi po 1 L/h posledica močno povečane obremenitve procesorja in/ali delovnega pomnilnika zaradi sočasnega izvajanja drugih potratnih procesov in spremenjene prioritizacije.

Stopnja konvergence je po 400 iteracijah odlična, konsistentno pa dobimo pri 8 L/h osamljen vrh, ki je tem višji, čim večja je toplotna prevodnost materiala. Vseeno pa je neto toplotni tok reda velikosti 10^{-6} , kar pri naših vhodnih 3 W pomeni μW odstopanja.

6.6 Naravna konvekcija

Do sedaj smo okolico pred modulom simulirali s plastjo zraka, kar pomeni, da je med njim in ABS ploščo potekalo le prevajanje. V resnici pa je zaradi narave in dimenzij našega problema povsem možno, da na stiku prenos toplote poteka (tudi) s konvekcijo². V ta namen smo izračunali vrednost Rayleighovega števila, pri čemer je referenčna temperatura zraka znašala 25 °C, za temperaturo stične površine pa smo vzeli največjo (7,5 °C) in najmanjšo (1,1 °C) površinsko-uteženo povprečno vrednost iz primernih že izvedenih simulacij. Tako smo dobili $\text{Ra}(1,1^\circ\text{C}) = 13000$ in $\text{Ra}(7,5^\circ\text{C}) = 88400$, kar pomeni, da konvekcija je prisotna in da je inducirani tok laminaren.

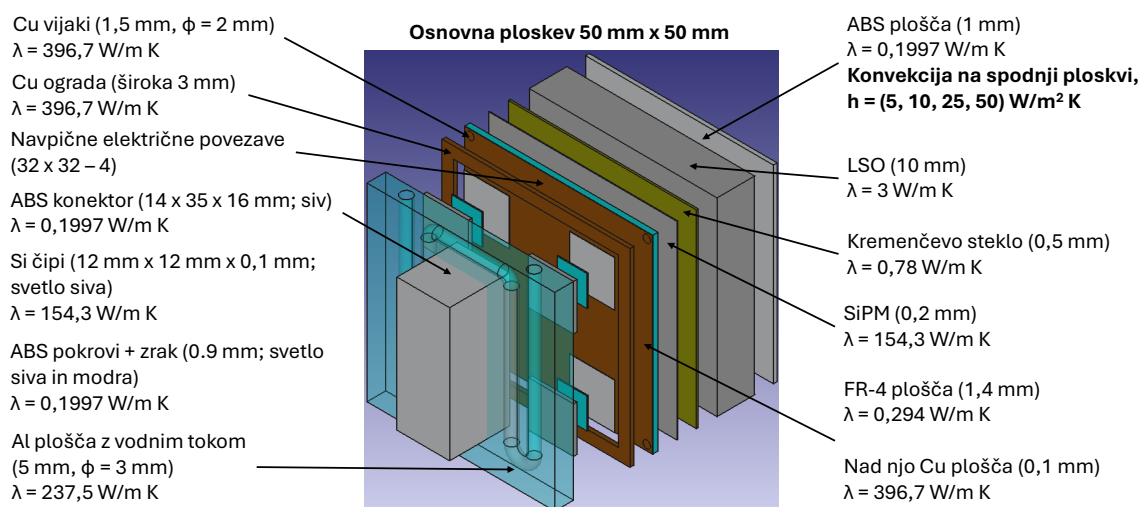
Z namenom sprostitev oz. rahle izboljšave mreže smo tako iz geometrije odstranili zrak in na spodnjo ploskev ABS postavili robni pogoj konvekcije s temperaturo

²V zračnem žepu med čipom in ABS pokrovom glede na temperature in dimenzije žepa konvekcija ne poteka.

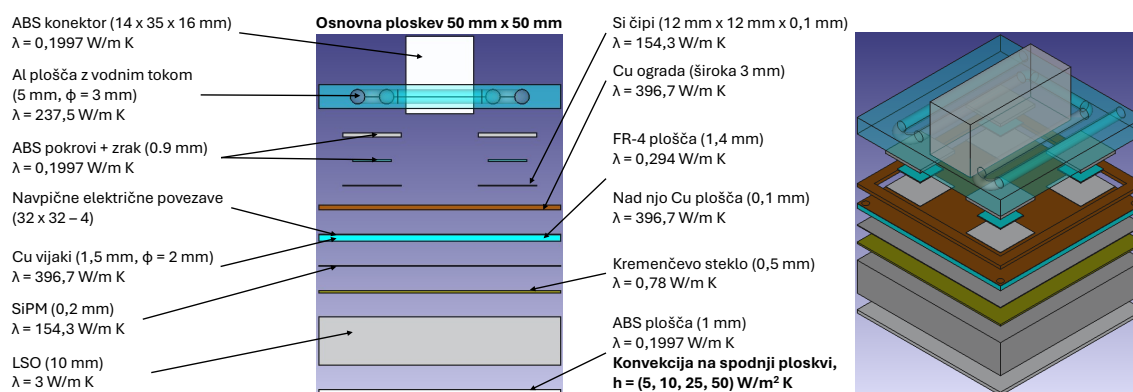
Poglavje 6. Rezultati

tekočine 25 °C. Simulacije smo izvedli za $h = 5, 10, 25$ in $50 \text{ W/m}^2\text{K}$. Zadnjo vrednost smo vključili iz dveh razlogov. Prvi je bil, da je po nekaterih virih to zgornja meja za naravno konvekcijo v zraku (namesto navedene $37 \text{ W/m}^2\text{K}$ iz tabele 3.3). Drugi pa je temeljil na predpostavki, da konvekcija v našem primeru poteka pri nižji vrednosti in lahko tako s postavitvijo $h = 50 \text{ W/m}^2\text{K}$ zaobjamemo še morebiten doprinos k prenosu toplote s prevajanjem³.

Geometrija je prikazana na slikah 6.31 in 6.32, slika 6.33 prikazuje spreminjanje temperatur s prostorninskim tokom in slika 6.34 spreminjanje temperatur z vrednostjo h .

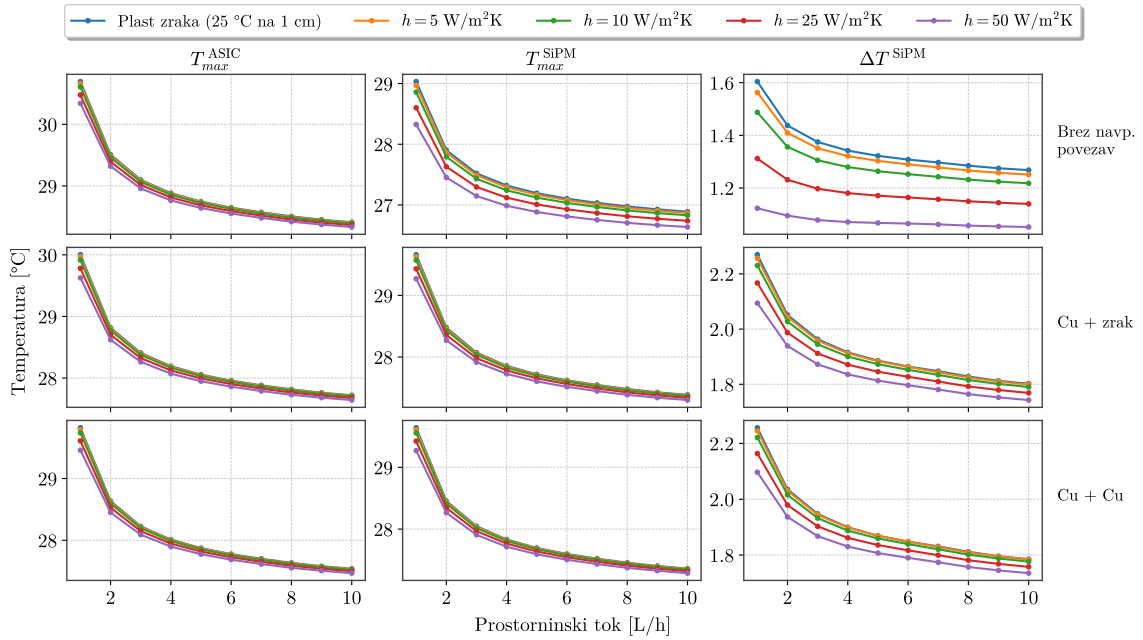


Slika 6.31: Prikaz geometrije za simulacijo konvekcije s pripadajočimi dimenzijami elementov in njihovimi toplotnimi prevodnostmi.

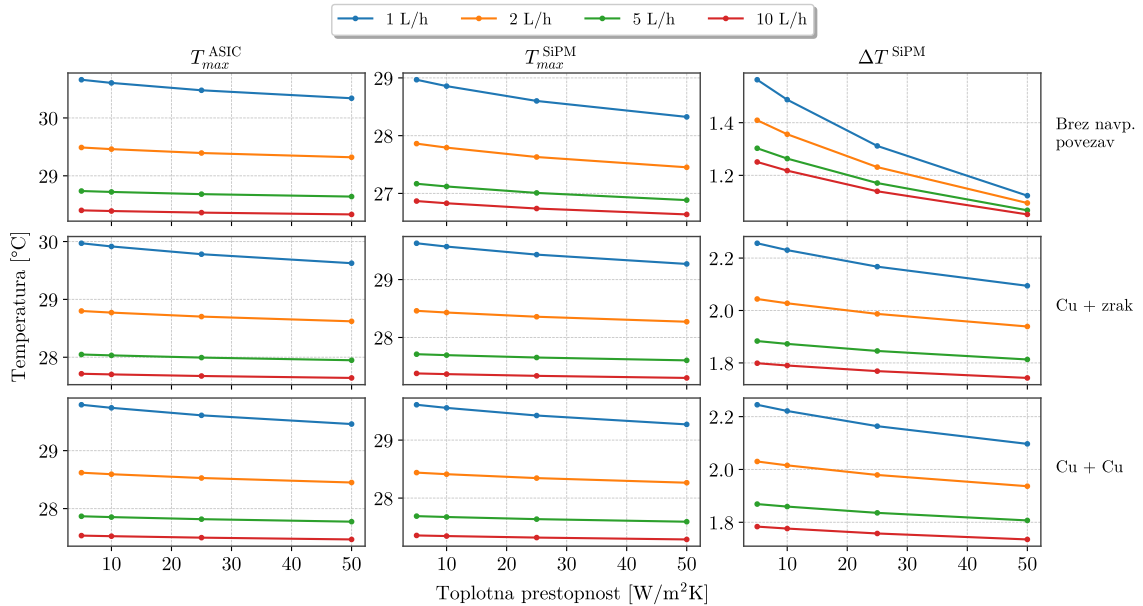


Slika 6.32: Stranski prikaz geometrije za simulacijo konvekcije s pripadajočimi dimenzijami elementov in njihovimi toplotnimi prevodnostmi (levo) in prikaz tlorisa v izometrični projekciji (desno).

³Iz izračunanih vrednosti Ra namreč ne moremo z gotovostjo trditi, da je prevajanje povsem zanemarljivo.



Slika 6.33: Prikaz odvisnosti T_{max}^{ASIC} , T_{max}^{SiPM} in ΔT^{SiPM} od prostorninskega toka za vse vrste povezav in vse vrednosti h . Za primerjavo je prikazan še primer s plastjo zraka.



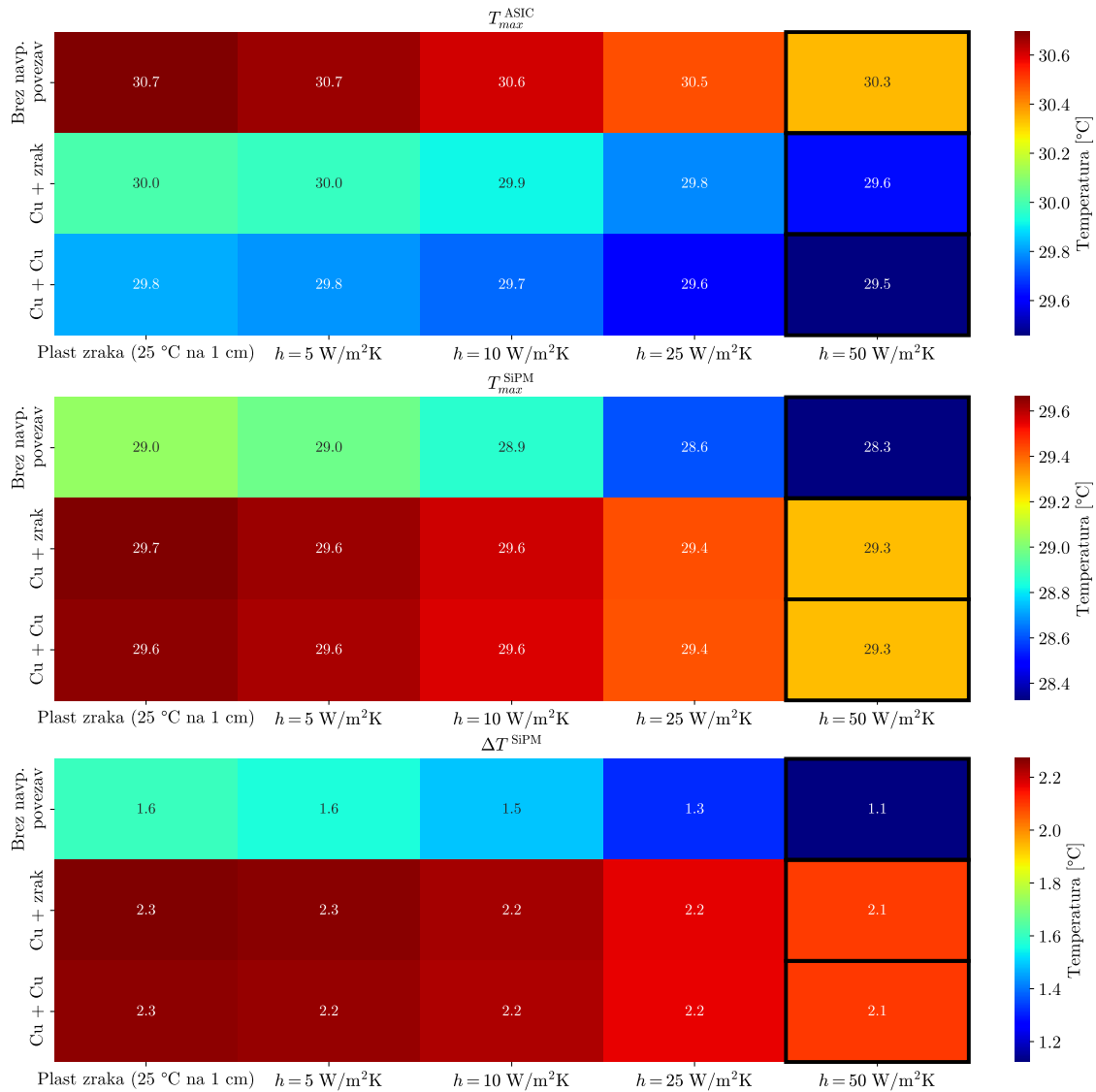
Slika 6.34: Prikaz odvisnosti T_{max}^{ASIC} , T_{max}^{SiPM} in ΔT^{SiPM} od vrednosti h za vse vrste povezav. Za potrebe preglednosti so izrisani le rezultati pri 1 L/h, 2 L/h, 5 L/h in 10 L/h.

Vidimo, da čeprav so si krivulje (predvsem maksimalnih temperatur) med seboj blizu, vseeno dobimo najboljše rezultate pri najvišji vrednosti h in najslabše v primeru zračne plasti. S stališča vpliva toplotne prestopnosti je to seveda smiselno, pomeni pa tudi, da konvekcija prevladuje, saj že pri zares nizkih 5 W/m²K dobimo nižje temperature od tistih v primeru s prevajanjem.

Poglavje 6. Rezultati

Do največjih sprememb pride na področju homogenosti na fotonski ravnini za primer brez povezav, kjer razlika med najvišjo in najnižjo krivuljo za $\Phi = 1$ L/h znaša okrog $0,5$ °C in se do pretoka 10 L/h zniža na približno $0,3$ °C. Pri ostalih dveh primerih gre za prehod iz $0,2$ °C na $0,1$ °C. V maksimalni temperaturi na ravnini čipov začnemo z razliko približno $0,5$ °C, ki se do 10 L/h skorajda izniči. Enako velja za T_{max}^{SiPM} v primerih s povezavami, brez povezav pa se krajni vrednosti dvigneta na približno $0,75$ °C in $0,5$ °C.

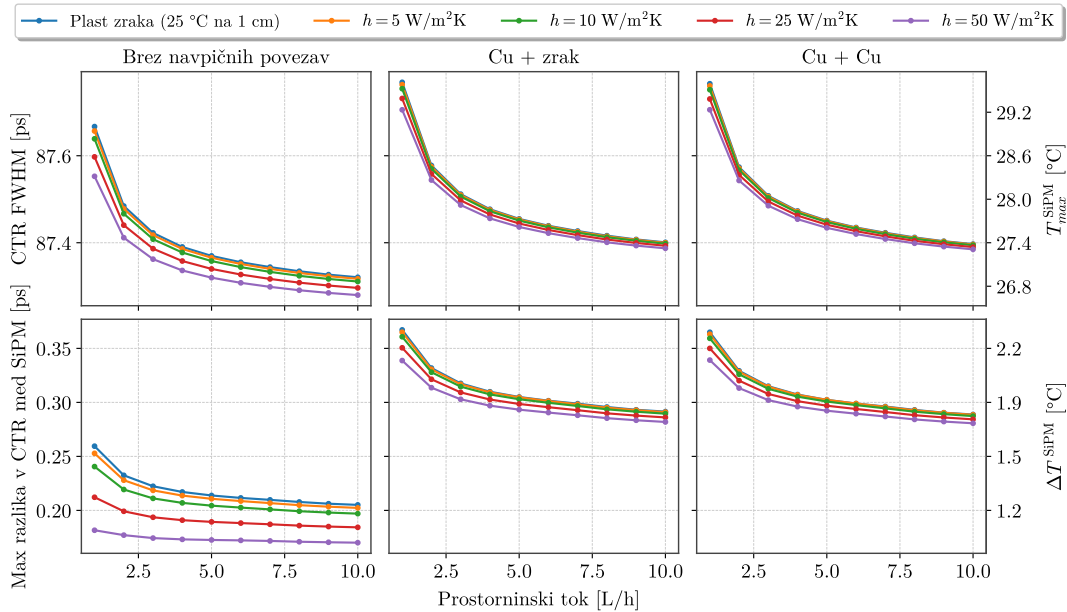
Natančneje si lahko temperature za $\Phi = 1$ L/h, ko so razlike med primeri največje, ogledamo na sliki 6.35.



Slika 6.35: Matrični prikaz vrednosti T_{max}^{ASIC} , T_{max}^{SiPM} in ΔT^{SiPM} pri $\Phi = 1$ L/h za plast zraka in vse vrednosti h za vse vrste povezav. Črn pravokotnik označuje minimalno vrednost obravnavane temperature pri dani sestavi povezave.

Odvisnost temperatur od h je dokaj šibka, saj dobimo pri 10-kratnem povečanju vrednosti koeficienta v najslabšem primeru 1 L/h spremembo maksimalnih temperatur velikosti nekako $0,75$ °C, spremembo homogenosti na fotonski ravnini pa velikosti približno $0,55$ °C. Z večanjem prostorninskega toka razlika za maksimalne tempera-

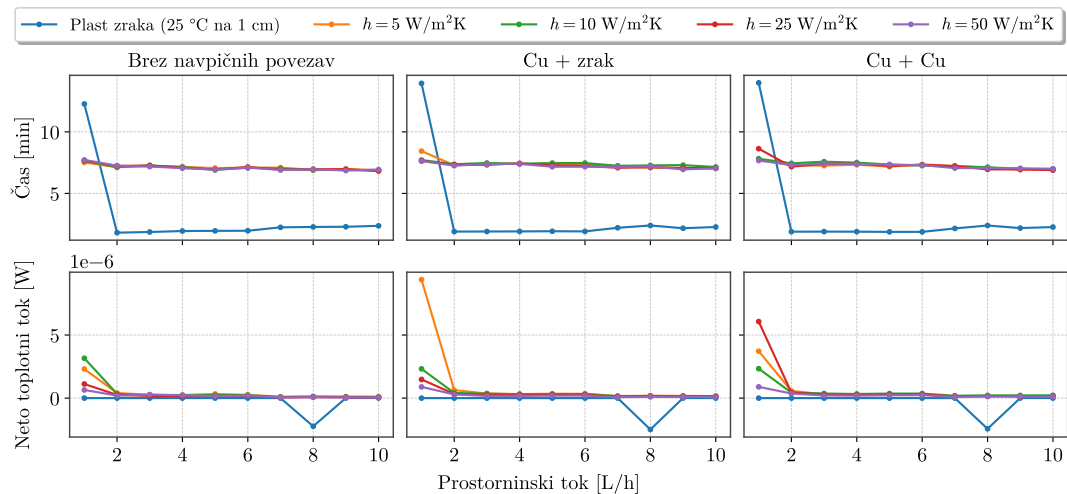
ture pade na približno $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, za homogenost na fotonski ravnini pa na nekako $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Videti je tudi, kot da se oblika krivulj z naraščajočim tokom približuje premici. Na sliki 6.36 si oglejmo še ocene CTR na podlagi slike 2.18.



Slika 6.36: Prikaz odvisnosti ocen CTR na podlagi slike 2.18 od prostorninskega toka za plast zraka in vse vrednosti h . Dodatno so na desni prikazane še temperature.

Vidimo, da se vrednosti CTR gibljejo med $87,3\text{ ps}$ in $87,8\text{ ps}$, največje razlike v ločljivostih pa med $0,15\text{ ps}$ in $0,35\text{ ps}$. Najboljša in najslabša ločljivost glede na robni pogoj se razlikujeta za približno $0,15\text{ ps}$ ($\Phi = 1\text{ L/h}$) in $0,05\text{ ps}$ ($\Phi = 10\text{ L/h}$) v primeru brez povezav ter za $0,08\text{ ps}$ ($\Phi = 1\text{ L/h}$) v primerih s povezavami, največji razliki pa za približno $0,09\text{ ps}$ v primeru brez povezav in $0,04\text{ ps}$ v primerih s povezavami. Prehod iz 1 L/h na 10 L/h prinese približno $0,3$ do $0,4\text{ ps}$ izboljšanje v CTR in $0,03$ do $0,07\text{ ps}$ izboljšanje v največji razliki CTR med SiPM.

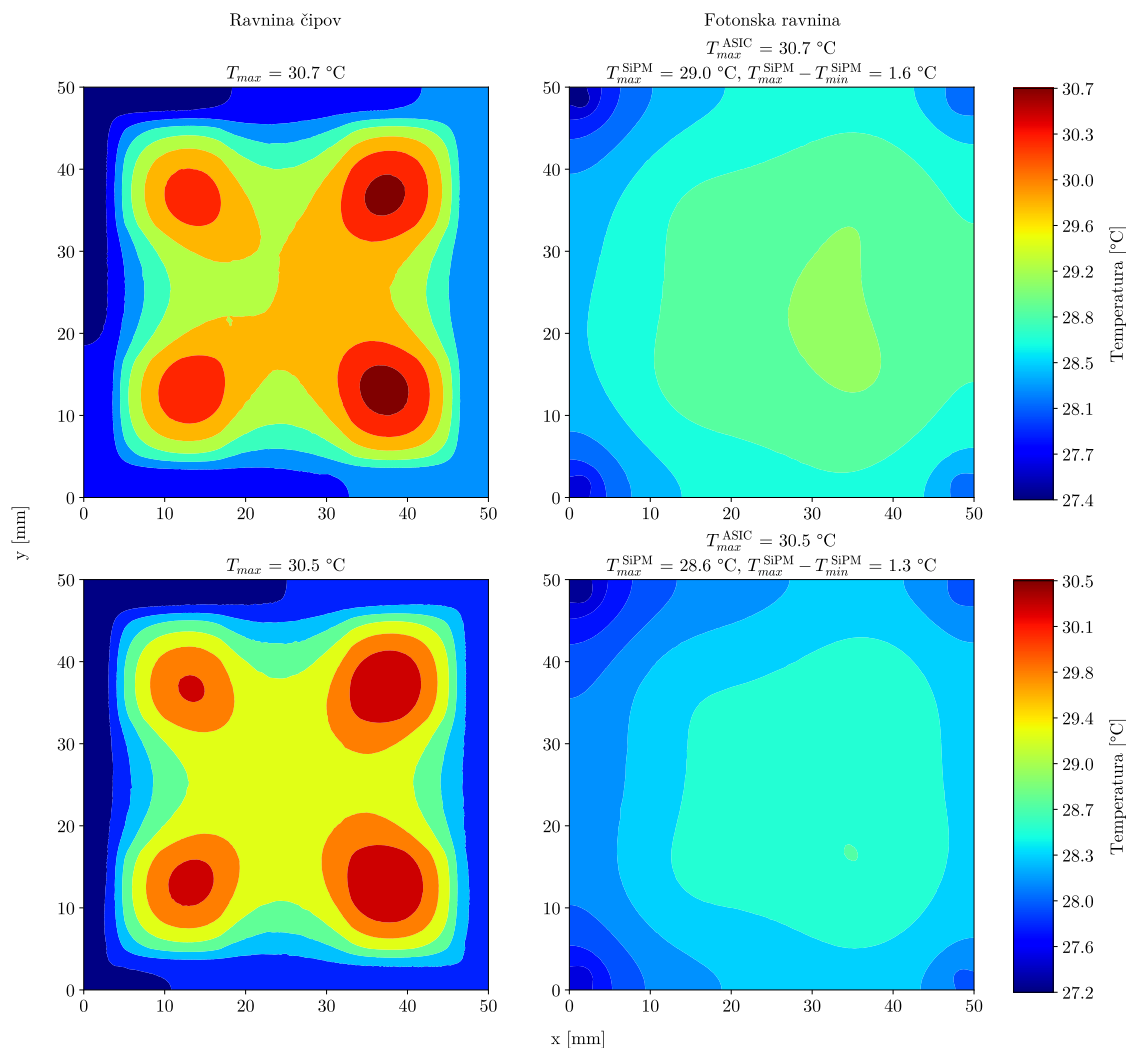
Ponovno si na sliki 6.37 oglejmo čase trajanja posamezne simulacije in dosežene stopnje konvergence po 400 iteracijah.



Slika 6.37: Prikaz odvisnosti trajanja simulacije in stopnje konvergence od prostorninskega toka po 400 iteracijah za vse vrste povezav.

Vidimo, da se čas trajanja simulacij z uvedbo konvekcije ustali na približno 7,5 min. Tudi neto toplotni tok ne vsebuje nobenih nenavadnih vrhov in se s povečevanjem pretoka celo malenkostno izboljšuje.

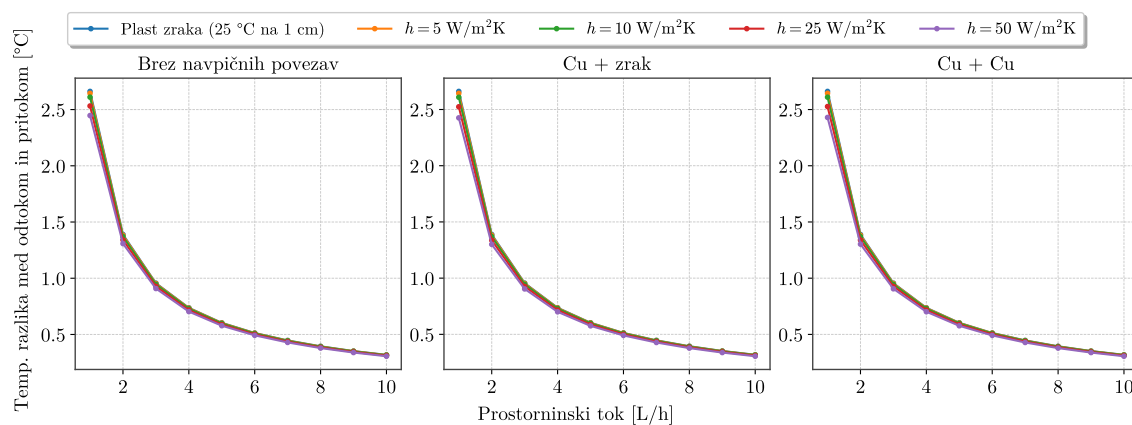
Na tem mestu lahko tudi preverimo, kako konvekcija vpliva na izgled oz. spremembe v izgledu temperaturnega profila na ravnini čipov in fotonski ravnini ter na razliko v temperaturi izhodne in vhodne vode. Primer profilov pri 1 L/h brez povezav je na sliki 6.38, prikaz sprememb temperature vode pa na sliki 6.39.



Slika 6.38: Prikaz temperaturnih profilov na ravnini čipov (levo) in fotonski ravnini (desno) s plastjo zraka (zgoraj) in s konvekcijo pri $h = 25\text{ W/m}^2\text{K}$ (spodaj). Izpisani sta pripadajoči maksimalni temperaturi čipov in SiPM ter temperaturni razliki na fotonski ravnini. Gre za primer $\Phi = 1\text{ L/h}$ brez povezav, kjer so si temperature med seboj podobne.

Vidimo, da so si profili med seboj zelo podobni, vseeno pa tista v primeru konvekcije na pogled morda delujeta malce bolj simetrično oz. osrediščeno. Kar se tiče temperaturnih razlik med odtokom in pritokom, so si poteki in lege krivulj po sestavah povezav praktično identične. Tudi največja sprememba po primerih od 1 L/h do 10 L/h preide iz kvečjemu $0,25\text{ °C}$ na zanemarljivo razliko. Ponovno ugotovimo, da že pri pretoku 1 L/h voda iz sistema izhaja le pri slabih 28 °C , pri 10 L/h pa je

njena temperatura skoraj enaka vhodni.



Slika 6.39: Prikaz odvisnosti temperaturne razlike med odtokom in pritokom od prostorninskega toka za vse vrste povezav. Za vrednost temperature na odtoku smo vzeli površinsko-uteženo povprečje.

7. Zaključek

V magistrskem delu smo raziskovali, na kakšen način doseči čim bolj učinkovito hlajenje posameznega senzorskega modula za pozitronsko tomografijo. Zagotoviti smo želeli čim nižjo maksimalno temperaturo čipov in SiPM ter temperaturno razliko na fotonski ravnini, saj predvsem zadnji dve močno vplivata na časovno ločljivost posamezne fotopomnoževalke in posledično na enotnost odziva celotnega modula.

Ugotovili smo, da z naraščajočo debelino ABS pokrova naraščajo vse tri obravnavane temperature. Sprememba glede na mejne vrednosti debelin znaša približno 8,5 °C za T_{max}^{ASIC} , dobre 3 °C za T_{max}^{SiPM} in približno 2 °C za ΔT^{SiPM} . Prisotnost ali odsotnost keramičnih ploščic pod čipi pa na temperature skorajda nima vpliva. Pokazali smo tudi, da dodatek bakrene ograde okrog čipov in njihovih pokrovov ugodno vpliva na obe maksimalni temperaturi, saj tista na ravnini čipov pade za dobrih 6 °C, na fotonski ravnini pa za več kot 10 °C. Debelina keramike med PCB in SiPM na T_{max}^{ASIC} praktično nima vpliva, šibko in negativno vpliva na T_{max}^{SiPM} , na ΔT^{SiPM} pa vpliva ugodno, in sicer prinese glede na mejni vrednosti debelin približno 1 °C izboljšanje.

Ob dodatku navpičnih električnih povezav v PCB in uvedbi vodnega hlajenja smo ugotovili, da se maksimalna temperatura na ravnini čipov pri pretoku $\Phi = 0,1$ L/h giblje med 50 °C in 60 °C, prehod na $\Phi = 1$ L/h zoži interval na 30 °C in 36 °C, pretok $\Phi = 10$ L/h pa ti vrednosti zniža za približno 2 °C. Z naraščajočo prevodnostjo povezav pri enakem pretoku T_{max}^{ASIC} pada. Na fotonski ravnini se najvišje temperature gibljejo med 50,5 °C in 51 °C za $\Phi = 0,1$ L/h, 29,5 °C in 30,5 °C za $\Phi = 1$ L/h in 27,5 °C in 28,5 °C za $\Phi = 10$ L/h. Presenetljivo je, da s povečevanjem prevodnosti povezav temperature na fotonski ravnini padajo. Ob primerjavi različnih geometrij smo ugotovili, da je najboljša izbira geometrija brez keramike med PCB in SiPM ter z bakreno ploščo na vrhu PCB. Znižanje temperature vhodne vode za 5 °C prinese enako znižanje maksimalnih temperatur, na homogenost temperature na fotonski ravnini pa z izjemo primera brez povezav ($\Delta T \approx 0,06$ °C) praktično nima vpliva.

V povezavi z lastnim gretjem SiPM smo zaključili, da za naš modul ne predstavlja težave, saj celo v zelo precenjenem primeru s proizvedenimi 100 mW pri pretoku $\Phi = 1$ L/h maksimalne temperature narastejo za manj kot 0,5 °C, homogenost na fotonski ravnini pa se poslabša za le 0,2 °C.

Kvalitativno obnašanje temperatur glede na material plošče z vodnim tokom je skladno s toplotnimi prevodnostmi materialov, pri čemer so razlike v maksimumih največje ob prehodu s TiC na Al₂O₃ oz. Si₃N₄ (približno 2,5 °C), nadaljnji prehod v AlN oz. Al pa prinese še dodatno izboljšanje velikosti 1 °C. Homogenost temperature na fotonski ravnini se ob obeh prehodih izboljša za približno 0,15 °C (brez povezav) oz. od 0,25 °C do 0,3 °C (s povezavami).

V zadnjem razdelku smo ugotovili še, da je naravna konvekcija prevladujoč na-

čin prenosa toplote med spodnjo ploskvijo ABS in okoliškim zrakom, pri čemer so temperaturne razlike med primeri največje za geometrijo brez povezav. Na fotonski ravnini razlika med najboljšim ($h = 50 \text{ W/m}^2\text{K}$) in najslabšim primerom (plast zraka s $25 \text{ }^\circ\text{C}$ na 1 cm) za $\Phi = 1 \text{ L/h}$ znaša okrog $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ in se do pretoka 10 L/h zniža na približno $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$. V maksimalni temperaturi na ravnini čipov začnemo z razliko približno $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ki se do 10 L/h skorajda izniči, za maksimalno temperaturo na fotonski ravnini pa krajni vrednosti znašata približno $0,75 \text{ }^\circ\text{C}$ in $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Odvisnost temperatur od h je dokaj šibka, saj spremembe tudi pri najnižjem pretoku 1 L/h v nobenem primeru ne presegajo $0,8 \text{ }^\circ\text{C}$. Temperaturne razlike med odtokom in pritokom so po sestavah povezav praktično identične, med primeri pa so si med seboj zelo podobne. Pri $\Phi = 1 \text{ L/h}$ znaša temperatura izhodne vode slabih $28 \text{ }^\circ\text{C}$, pri 10 L/h pa je njena temperatura skoraj enaka vhodnim $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Možnosti za nadaljnje delo lahko razdelimo v dve kategoriji, in sicer v izboljšanje natančnosti in izboljšanje verodostojnosti. Prva se nanaša na kvaliteto uporabljenih mrež, saj smo morali zaradi omejitev študentske verzije pri njihovem načrtovanju ves čas vzdrževati ravnovesje med čim večjo kakovostjo in številčnostjo. Čeprav so bile vrednosti metrik za naše mreže povsem sprejemljive, pa izboljšave predvsem na področju števila elementov po debelini vsakega telesa gotovo ne bi škodile.

Verodostojnost rezultatov bi lahko izboljšali s poznavanjem lastnosti stikov med posameznimi gradniki geometrije in posledično uvedbo ustreznih toplotnih kontaktnih upornosti. Poleg tega bi ob neomejenem številu elementov mreže efektivne lastnosti plasti PCB na račun povezav zamenjali z njihovo dejansko vključitvijo v geometrijo. Končno pa bi lahko tudi določene gradnike geometrije izdelali bolj realistično (npr. našo ploščo silicija bi nadomestili z mrežo SiPM, pri čemer bi bila lahko tudi posamična fotopomnoževalka sestavljena iz več teles z ustreznimi lastnostmi, ki bi odražala njeno resnično zgradbo).

8. Literatura

- [1] S. Piatek, *What is an SiPM and how does it work?*, Hamamatsu Corporation (2016), [zadnjič obiskano 10. 6. 2025].
- [2] M. Dagarin, *Optimizacija čitalnega sistema za karakterizacijo silicijevih fotopomnoževalk*, Magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko (2024).
- [3] C. Leroy in P.-G. Rancoita, *Silicon Solid State Devices and Radiation Detection* (WORLD SCIENTIFIC, 2012) <https://www.worldscientific.com/doi/pdf/10.1142/8383>.
- [4] C. Xu, *Study of the Silicon Photomultipliers and Their Applications in Positron Emission Tomography*, Doktorska disertacija, Department Physik der Universität Hamburg (2014).
- [5] D. Prêle, D. Franco, D. Ginhac, K. Jradi, F. Lebrun, S. Perasso, D. Pellion, A. Tonazzo in F. Voisin, *SiPM cryogenic operation down to 77 K, v 10th International Workshop On Low Temperatures Electronics (WOLTE10)* (Paris, France, 2013) str. 30–34.
- [6] P. K. Lightfoot, G. J. Barker, K. Mavrokoridis, Y. A. Ramachers in N. J. C. Spooner, *Characterisation of a silicon photomultiplier device for applications in liquid argon based neutrino physics and dark matter searches*, Journal of Instrumentation **3** (10), P10001.
- [7] G. Zajc, *Okrevanje silicijevih fotopomnoževalk po obsevanju z nevtroni*, Magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko (2020).
- [8] R. Dolenec, *Detekcija posameznih fotonov s silicijevo fotopomnoževalko*, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko (2007).
- [9] N. Dinu, A. Nagai in A. Para, *Breakdown voltage and triggering probability of SiPM from IV curves at different temperatures*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **845**, 64 (2017), proceedings of the Vienna Conference on Instrumentation 2016.
- [10] K. K. A. Ghassemi, K. Sato, *MPPC*, Hamamatsu Corporation (2018), [zadnjič obiskano 11. 6. 2025].
- [11] F. Acerbi, *Time resolution of analog SiPMs: techniques and setups examples*, v *International Conference on the Advancement of Silicon Photomultipliers* (Schwetzingen, Germany, 2018).

- [12] F. Acerbi, G. Paternoster, A. Gola, V. Regazzoni, N. Zorzi in C. Piemonte, *High-Density Silicon Photomultipliers: Performance and Linearity Evaluation for High Efficiency and Dynamic-Range Applications*, IEEE Journal of Quantum Electronics **54**, 1 (2018).
- [13] PETVision, <https://petvision.org/>, [zadnjič obiskano 19. 8. 2025].
- [14] Wikipedia contributors, *Quantum tunnelling — Wikipedia, The Free Encyclopedia* (2025), [zadnjič obiskano 11. 6. 2025].
- [15] D. Real, D. Calvo, J. d. D. Zornoza, M. Manzaneda, R. Gozzini, C. Ricolfe-Viala, R. Lajara in F. Albiol, *Fast Coincidence Filter for Silicon Photomultiplier Dark Count Rate Rejection*, Sensors **24**, 10.3390/s24072084 (2024).
- [16] S. Piatek, *Physics and operation of the MPPC silicon photomultiplier*, Hamamatsu Corporation (2014), [zadnjič obiskano 13. 6. 2025].
- [17] J. B. McLaughlin, G. Gallina, F. Retière, A. De St. Croix, P. Giampa, M. Mah-tab, P. Margetak, L. Martin, N. Massacret, J. Monroe, M. Patel, K. Raymond, J. Roiseux, L. Xie in G. Zhang, *Characterisation of SiPM Photon Emission in the Dark*, Sensors **21**, 10.3390/s21175947 (2021).
- [18] A. Lacaita, F. Zappa, S. Bigliardi in M. Manfredi, *On the bremsstrahlung origin of hot-carrier-induced photons in silicon devices*, IEEE Transactions on Electron Devices **40**, 577 (1993).
- [19] I. Rech, A. Ingargiola, R. Spinelli, I. Labanca, S. Marangoni, M. Ghioni in S. Cova, *Optical crosstalk in single photon avalanche diode arrays: a new complete model*, Optics Express **16**, 8381 (2008).
- [20] D. Renker, *Silicon Photomultipliers*, v *4th International Conference on New Developments in Photodetection* (Beaune, France, 2005).
- [21] M. S. Nitschke, *Characterization of Silicon Photomultipliers Before and After Neutron Irradiation*, Magistrsko delo, Universität Hamburg (2016).
- [22] A. N. Otte, D. Garcia, T. Nguyen in D. Purushotham, *Characterization of three high efficiency and blue sensitive silicon photomultipliers*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **846**, 106–125 (2017).
- [23] A. Ferri, F. Acerbi, A. Gola, G. Paternoster, C. Piemonte in N. Zorzi, *A comprehensive study of temperature stability of Silicon PhotoMultiplier*, Journal of Instrumentation **9** (06), P06018.
- [24] AP Technologies, *Silicon Photomultiplier Temperature Dependency*, [zadnjič obiskano 16. 6. 2025].
- [25] M. Lucchini, Y. Musienko in A. Heering, *Experimental method to monitor temperature stability of SiPMs operating in conditions of extremely high dark count rate*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **977**, 164300 (2020).

-
- [26] E. Garutti, S. Martens, J. Schwandt in C. Villalba-Pedro, *Determination of Self-Heating in Silicon Photomultipliers*, Sensors **24**, 10.3390/s24092687 (2024).
- [27] J. Seliger, *Toplota*, [zadnjič obiskano 24. 6. 2025].
- [28] J. Strnad, *Fizika. Del 1*, 2. izd., Zv. 9 (DMFA - založništvo, 2016) predgovor / Milena Strnad: str. 6.
- [29] J. M. Thomson, *Taylor vortices and Benard cells: The emergent complexity of two simple fluid systems*, Middlebury College, Department of Physics (2000).
- [30] Rayleigh Number - (heat and mass transfer) - vocab, definition, explanations, <https://library.fiveable.me/key-terms/heat-mass-transfer/rayleigh-number>, [zadnjič obiskano 7. 7. 2025].
- [31] Ansys Fluent Theory Guide (2024 R2), https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/flu_th/flu_th.html (2025), [zadnjič obiskano 7. 7. 2025].
- [32] USDOE, *DOE Fundamentals Handbook: Thermodynamics, Heat Transfer, and Fluid Flow, Volume 2* (U.S. Department of Energy, Washington, DC (United States), 1992).
- [33] Understanding Convective Heat Transfer: Coefficients, Formulas & Examples, https://www.engineeringtoolbox.com/convective-heat-transfer-d_430.html, [zadnjič obiskano 2. 7. 2025].
- [34] Convective Heat Transfer Coefficients Table Chart, https://www.engineersedge.com/heat_transfer/convective_heat_transfer_coefficients__13378.htm, [zadnjič obiskano 2. 7. 2025].
- [35] D. Goričanec in L. Črepinšek Lipuš, *Prenos toplote*, Univerza v Mariboru, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo (2008), zapiski predavanj.
- [36] Ansys Fluent, <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>.
- [37] Ansys Student (2024 R2), <https://www.ansys.com/academic/students/ansys-student>.
- [38] A. Cebula in D. Taler, *Finite Volume Method in Heat Conduction*, v *Encyclopedia of Thermal Stresses*, ur. R. B. Hetnarski (Springer Netherlands, Dordrecht, 2014) str. 1645–1658.
- [39] Finite Volume Method (FVM), https://help.altair.com/hwcfdsolvers/acusolve/topics/acusolve/training_manual/finite_volume_method_r.htm, [zadnjič obiskano 27. 6. 2025].
- [40] FreeCAD, <https://www.freecad.org/index.php>.
- [41] Ansys Fluent User's Guide (2024 R2), https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/flu_ug/tgd_user_report.html%23tgd_user_report_printinfo (2025), [zadnjič obiskano 7. 7. 2025].

- [42] Orthogonal Quality, https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v251/en/wb_msh/msh_orthogonal_quality.html (2025), [zadnjič obiskano 7. 7. 2025].
- [43] What is a Printed Circuit Board (PCB)?, <https://www.ansys.com/simulation-topics/what-is-a-printed-circuit-board>, [zadnjič obiskano 10. 7. 2025].
- [44] Mastering Integration: Chips on PCBs, <https://pcbmake.com/chip-pcb/> (2024), [zadnjič obiskano 10. 7. 2025].
- [45] S. Gómez, J. Alozy, M. Campbell, J. Fernandez-Tenllado, R. Manera, J. Mauricio, C. Pujol, D. Sanchez, A. Sanmukh, A. Sanuy, R. Ballabriga in D. Gascon, *FastIC: a fast integrated circuit for the readout of high performance detectors*, Journal of Instrumentation **17** (05), C05027.
- [46] The Ultimate Guide to Understanding PCB Thickness, <https://www.viasion.com/guide-to-understanding-pcb-thickness/> (2024), [zadnjič obiskano 13. 7. 2025].
- [47] Tehniška fizika, *Toplota* (2009/10), [zadnjič obiskano 24. 6. 2025].
- [48] K. B. Kiradjev, S. A. Halvorsen, R. A. Van Gorder in S. D. Howison, *Maxwell-type models for the effective thermal conductivity of a porous material with radiative transfer in the voids*, International Journal of Thermal Sciences **145**, 106009 (2019).
- [49] Granta Materials Data for Simulation, <https://www.ansys.com/products/materials/materials-data-for-simulation#tab1-1> (2024), [zadnjič obiskano 21. 7. 2025].