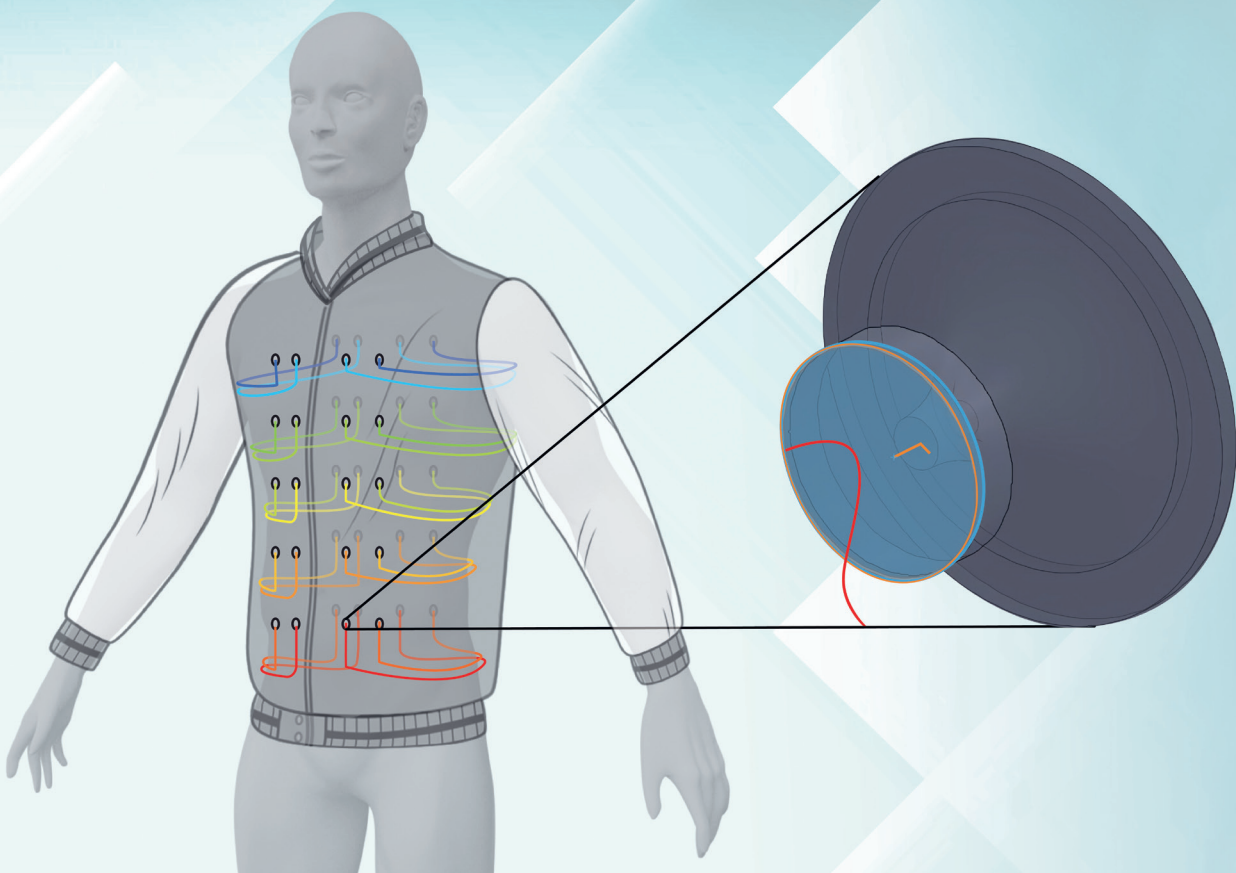


**Sanjay Rajni Vejanand**

## **VĒDINĀMĀ AIZSARGAPĢĒRBA ĪPAŠĪBU OPTIMIZĀCIJA**

Promocijas darba kopsavilkums



# RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Būvniecības un mašīnbūves fakultāte  
Mašīnbūves un biomedicīnas inženierijas institūts

**Sanjay Rajni Vejanand**

Doktora studiju programmas “Mašīnbūve un mehānika (mašīnu dinamika un konstruēšana)”  
doktorants

## VĒDINĀMĀ AIZSARGAPĢĒRBA ĪPAŠĪBU OPTIMIZĀCIJA

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs  
profesors *Dr. sc. ing.*  
ALEKSANDRS JANUŠEVSKIS

RTU Izdevniecība  
Rīga 2024

Vejanand, S. R. Vēdināmā aizsargapģērba īpašību optimizācija. Promocijas darba kopsavilkums.  
Rīga: RTU Izdevniecība, 2024. 55 lpp.

Publicēts saskaņā ar 2024. gada 29. aprīļa  
promocijas padomes lēmumu "RTU P-04", protokols  
Nr. 61.

Vāka attēla autors Sanjay Rajni Vejanand

<https://doi.org/10.7250/9789934371080>  
ISBN 978-9934-37-108-0 (pdf)

# PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2024. gada 12. septembrī 14.30 Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības un mašīnzinību fakultātē, Ķīpsalas ielā 6B, 420. telpā.

## OFICIĀLIE RECENZENTI

Asociētā profesore *Dr. sc. ing.* Marina Čerpinska,  
Rīgas Tehniskā universitāte

Docents *Ph. D. Shravan Koundinya Vutukuru,*  
*MVJ College of Engineering,* Indija

*Ph. D. Chawki Abdessemed,*  
*Cranfield University,* Apvienotā Karaliste

## APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Sanjay Rajni Vejanand



Datums: 15.04.2024.

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā. Tajā ir ievads, piecas nodaļas, secinājumi, 77 attēli, 12 tabulu, kopējais lappušu skaits – 144. Bibliogrāfijā ir 159 nosaukumi.

## SATURS

ANOTĀCIJA .....	5
PRIEKŠVārds .....	6
DISERTĀCIJAS KOPSAVILKUMS .....	7
<b>1. IEVADS .....</b>	<b>7</b>
1.1. Darba mērķis .....	8
1.2. Darba galvenie uzdevumi .....	8
1.3. Darba zinātniskā novitāte .....	9
1.4. Darba praktiskā vērtība .....	9
1.5. Ventilācijas iestatīšanas piemērs modelim .....	9
1.6. Pētniecības metodes .....	10
1.7. Aprobācija .....	11
1.8. Publikācijas .....	11
DARBA SATURS .....	13
<b>2. LITERATŪRAS APSKATS .....</b>	<b>13</b>
2.1. Literatūras apskata secinājumi .....	20
<b>3. PĒTĪTĀ OBJEKTA (APĢĒRBS) ANALĪZE UN FLŪĪDA PLŪSMAS MODELIS: SOLIDWORKS PLŪSMAS SIMULĀCIJA .....</b>	<b>21</b>
3.1. Ventilācijas modeļa robežnosacījumi .....	21
3.2. Dažādu vienkāršu ventilācijas elementu formu analīze .....	23
3.3. Sarežģītas formas ventilācijas elementu salīdzinošā analīze .....	29
3.4. Dažādu formu ventilācijas elementu analīzes secinājumi .....	31
<b>4. PĒTNICĪBAS OBJEKTA (APĢĒRBA) MODEĻA MODELĒŠANAS IEVADES DATU VEIDOŠANA .....</b>	<b>31</b>
4.1. Ventilācijas elementa formas optimizācijas uzdevuma formulējums .....	31
4.2. Ventilācijas elementa analīze ar pastāvīgu šķērsriezuma laukuma atvērumu un bez tā .....	36
4.3. Atbilstošu kritēriju izvēle ventilācijas elementa optimizācijai .....	42
4.4. Ventilācijas elementa formas optimizācijas secinājumi .....	45
<b>5. PĒTĪTĀ OBJEKTA (APĢĒRBS) UN VENTILĀCIJAS ELEMENTA EFEK- TIVITĀTES ANALIZĒŠANA AR SOLIDWORKS PLŪSMAS SIMULĀCIJU .....</b>	<b>46</b>
5.1. Ventilācijas elementa efektivitātes analīze ar vienkāršu modeli .....	46
5.2. Vienkāršots modeļa dizains un robežnosacījumi .....	46
5.3. Atbilstošu kritēriju izvēle ventilējamā apģērba efektivitātes analīzei .....	49
5.4. Secinājumi par atbilstošiem kritērijiem ventilējamā apģērba efektivitātes analīzei .....	51
SECINĀJUMI .....	52
ATSAUCES .....	53

## ANOTĀCIJA

Lai aizsargātu cilvēka ķermeni no ārējās vides ietekmes, piemēram, lietus, putekļiem, tieša saules starojuma, kukaiņu piekļuves un kodumiem, apģērba ārējam slānim var nebūt gaisa caurlaidības, un tā rezultātā ap ķermeni uzkrājas mitrs un silts gaiss, kas var izraisīt diskomfortu vai pat pārkaršanu. Apģērbs ar aizveramām ventilācijas atverēm izstrādāts, lai uzlabotu gaisa cirkulāciju vietās, kur notiek intensīva svīšana. Tomēr šī metode tikai ierobežotā mērā uzlabo gaisa apmaiņu un pilnībā neatrisina problēmu. Darbā apskatītā dizaina galvenā priekšrocība ir nodrošināt efektīvu cilvēka ķermeņa aizsardzību no dažādiem ārējās vides apstākļiem, vienlaikus saglabājot nepieciešamo gaisa cirkulāciju un ventilāciju zem apģērba, lai samazinātu ķermeņa pārkaršanas risku. Materiāla tehniskās un funkcionālās īpašības nodrošina spēcīgu konkurētspēju, salīdzinot ar citiem tirgū esošajiem gaisu caurlaidīgajiem materiāliem izmantošanai ventilācijas aizsargapģērba ārējā slānī.

Darba mērķis ir analizēt un optimizēt ventilācijas elementu aerodinamiskās īpašības, lai panāktu pareizu gaisa caurlaidības, mehānisko un funkcionālo īpašību līdzsvaru aizsardzībai pret ārējie vides faktoriem. Darbs ir vērstis tādu uz ventilācijas elementu izveidi, ko var nostiprināt pie ventilācijas atverēm aizsargtērpā iekšpusē. Piestiprinātie ventilācijas elementi var uzlabot apģērba īpašības, aizsedzot ventilācijas atveres un ierobežojot putekļu, tiešas saules gaismas, kukaiņu un piesārņojumu nokļūšanu tiešā saskarē ar ķermeni, vienlaikus nodrošinot pareizu gaisa cirkulāciju starp ķermeni un apģērbu. Mērķa sasniegšanai izveidotas un izvērtētas dažādas ventilācijas elementu formas, lai noteiktu visefektīvāko. Turklāt piemērota ventilācijas elementa formas optimizācija tiek panākta, izmantojot aproksimācijas un optimizācijas metodes. *SolidWorks Flow Simulation* tiek izmantots, lai aprēķinātu spiedienu, temperatūru un siltuma plūsmu cilvēka ķermeņa vienkāršotajam eliptiskajam modelim ar aizsargjaku. Mērķis ir noteikt elementa ģeometrisko formu, kas rada vismazākos plūsmas enerģijas zudumus šūnas plūsmas kanālā, ko parāda spiediena starpība ( $\Delta P$ ). Enerģijas zudumi plūsmā palielinās ar lielāku  $\Delta P$ , un ķermeņa dzesēšana samazinās, kad plūsma samazinās vai zaudē enerģiju. Elementi ar lielāku temperatūras starpību var nodrošināt efektīvāku dzesēšanu, jo siltuma pārneses ātrums palielinās līdz ar temperatūras starpību. Lai novērtētu ventilācijas elementu efektivitāti un ventilējamā apģērba kopējo efektivitāti, tālākajos pētījumos tika analizēti dažādi kritēriji, piemēram, siltuma pārneses ātrums, siltuma plūsma un kopējās entalpijas izmaiņas.

**Atslēgvārdi:** *CFD*, ventilācijas elements, aizsargapģērbs, formas optimizācija, plūsmas simulācija.

## PATEICĪBAS

Šis promocijas darbs ir rezultāts manām studijām Rīgas Tehniskajā universitātes Mehānikas un mašīnbūves institūtā no 2020. gada oktobra līdz 2024. gada martam. Savā doktorantūras ceļā saskāros ar zinātniskajiem atklājumiem un grūtībām, kas saistītas ar pētījumu veikšanu. Tas pamudināja mani pievērsties pētījumam par ventilējamu apģērbu gaisa plūsmas analīzi, galvenokārt tāpēc, ka iepriekš esmu apguvis *CAD*, *FEM* un cietu ķermeņu mehāniku.

Sirsnīgs paldies Rīgas Tehniskajai universitātei par doto iespēju un nepieciešamajiem resursiem doktorantūras studiju realizēšanai! Paldies Doktorantūras studiju nodaļai par nepieciešamo finanšu fondu un atbalstu manā pētniecības darbā! Paldies arī visiem, kas gan tieši, gan netieši sniedza palīdzību mana promocijas darba izstrādē! Īpaši sirsnīgs paldies manam zinātniskajam vadītājam profesoram *Dr. sc. ing.* Aleksandram Januševskim un docentam *Ph. D.* Ivo Vaicim, kuri man palīdzēja ar vērtīgiem norādījumiem un iedrošinājumu! Paldies Agrim Guļevskim par palīdzību, ekspertīzi un ieteikumiem!

Mani draugi un doktorantūras studiju biedri sniedza man atbalstu, kas uzlaboja un atviegloja manus pētījumus. Viņu ciešā saikne un savstarpējais atbalsts ievērojami palīdzēja atvieglot manu sarežģīto doktorantūras studiju gaitu. Īpašs paldies Džeiminam Sančanijam (*Jaymin Sanchaniya*) un Umešam Vavalijam (*Umesh Vavaliya*) par palīdzību un atbalstu, ko viņi man sniedza visā šajā laikā!

Nobeigumā vēlos teikt, ka no sirds pateicos saviem vecākiem un ģimenei par viņu nepārtraukto atbalstu un mīlestību. Pateicoties viņu nelokāmajam atbalstam, esmu veiksmīgi izgājis visus dažādos izglītības līmeņus, un viņi man ir pastāvīgi stāvējuši līdzās visos dzīves izaicinājumos un sasniegumos. Bez viņu atbalsta es nebūtu spējis sasniegt tādu panākumu un sasniegumu līmeni, kādu esmu sasniedzis šodien.

Sanjay Rajni Vejanand  
Rīga, 2024. gada marts

# PROMOCIJAS DARBA KOPSAVILKUMS

## 1. IEVADS

Ekstrēmu temperatūru iedarbība var traucēt cilvēka termoregulāciju. Tāpēc apģērba projektēšanas un izstrādes procesā ir būtiski ņemt vērā auduma dzesēšanas un ventilācijas ietekmi uz cilvēka komfortu [1]. Tirgū ir pieprasījums pēc uzlabotiem tehniskiem risinājumiem un materiāliem aizsargapģērba ārējai daļai. Šiem risinājumiem jānodrošina laba ventilācija, jo īpaši siltos laika apstākļos un smagu fizisko aktivitāšu laikā. Tas ir saistīts ar pieaugošo interesi tirgū par efektīvu cilvēka aizsardzību pret ekstrēmu laikapstākļu iedarbību. Ir pieejami daudzi un dažādi aizsargapģērbu veidi, lai pasargātu cilvēka ķermeni no dažādiem ārējiem laikapstākļiem, piemēram, lietus, putekļiem, tiešā saules starojuma, kukaiņu piekļuves un to kodumiem. Ķermeņa pārkaršana var rasties, ja indivīdiem nepieciešams valkāt aizsargapģērbus siltā vidē vai lielas slodzes apstākļos [2]. Tas ir saistīts ar auduma ārējā slāņa nepietiekamo gaisa caurlaidību, kā rezultātā uz ķermeņa uzkrājas silts un mitrs gaiss, kas rada diskomfortu. Lai optimizētu gaisa cirkulāciju, apģērbā ir izveidotas regulējamās ventilācijas atveres un elpojošās zonas. Tomēr šāda pieeja tikai nedaudz uzlabo gaisa cirkulāciju, vienlaikus apdraudot apģērba mehāniskās īpašības. Piemērotu ventilācijas elementu piestiprināšana ventilācijas atveru iekšpusē var uzlabot apģērba mehānisko izturību. Tas ļauj nodrošināt pareizu gaisa cirkulāciju, vienlaikus novēršot putekļu, lietus pilieni, saules starojuma un kukaiņu tiešu nokļūšanu uz ķermeņa.

Promocijas darba pētījums saistīts ar izveidojamā materiāla un ventilācijas elementu aerodinamisko īpašību analīzi un optimizāciju, lai panāktu līdzsvaru starp gaisa caurlaidību, mehānisko izturību un funkcionālajām īpašībām ar mērķi nodrošināt aizsardzību pret ārējās vides apstākļiem. Darbs vērsts uz jaunu metodoloģijas izstrādi, eksperimentālo plānu, aproksimāciju un optimizāciju metožu lietojumam. Promocijas darbs veicinās jaunizveidoto algoritmu un pieeju ieviešanu, integrējot tos konkrētā metodoloģijā. Tas ļaus veikt sarežģītus uzdevumus, piemēram, optimizēt ventilācijas elementu konstrukciju. Izpratnes iegūšana par gaisa plūsmas mijiedarbību ar modeli ir būtisks un sarežģīts uzdevums. Lai samazinātu problēmas sarežģītību, ir izstrādāts un pētījumā izmantots vienkāršots eliptiskas formas cilvēka ķermeņa un jakas modelis. Lai aprēķinātu gaisa plūsmas mijiedarbību ar modeli un analizētu rezultātus, tiek izmantots *SolidWorks Flow Simulation* rīks. Darbā analizēti arī dažādu formu ventilācijas elementi, aplūkota metamodelēšanas pieeja, izmantojot dažādas kārtas polinomu lokālās un globālās aproksimācijas, kā arī *Kriging* aproksimācijas, lai optimizētu ventilācijas elementa formu. Lai izveidotu eksperimentu plānu un turpmāko aproksimācijas un optimizācijas uzdevumu, izmantota optimizācijas programmatūra *KEDRO*. Ventilācijas elementu efektivitātes novērtēšanai tika izmantoti dažādi kritēriji. Šie kritēriji tika izmantoti arī, lai novērtētu ventilācijas modeļa efektivitāti ar dažādu ventilācijas skaitu. Visbeidzot, tika veikta skaitliskā simulācija un fizikālie eksperimenti, izmantojot termisko manekenu, lai salīdzinātu rezultātus un definētu secinājumus.



## 1.1. Darba mērķis

Promocijas darba mērķis ir analizēt un optimizēt materiālu un ventilācijas elementu aerodinamiskās īpašības, kas tiks izstrādāti atkarībā no apgērba veida, lai panāktu līdzsvaru starp gaisa caurlaidību, mehāniskajām un funkcionālajām īpašībām, nodrošinot aizsardzību pret ārējās vides apstākļiem. Jaunizstrādātās sistēmas un ventilācijas elementa galvenā priekšrocība ir tā, ka tas nodrošina labu cilvēka ķermeņa aizsardzību pret dažādu ārējās vides apstākļu, piemēram, lietus, putekļu, tiešā saules starojuma, kukaiņu piekļuves un to kodumu, ietekmi. Šī aizsardzība tiek panākta, nodrošinot nepieciešamo gaisa cirkulāciju jeb ventilāciju, izmantojot ventilācijas elementus, kas savukārt samazina ķermeņa pārkaršanas iespēju. Darbā izstrādāta metodoloģija aproksimāciju un optimizāciju veikšanai. Promocijas darba rezultāti ļaus ieviest praksē jaunizstrādātos algoritmus un pieejas, iekļaujot tos konkrētā metodoloģijā un nodrošinot to, ka tiks veikti sarežģīti uzdevumi, piemēram, ventilācijas elementu formas optimizācija. Lai nodrošinātu nepieciešamo ventilāciju arī siltos klimatiskos apstākļos un fiziskas slodzes laikā, ir nepieciešams efektīvāks tehniskais risinājums un materiāls aizsargapģērba ārējam slānim. Tas ir saistīts ar pieaugošo tirgus interesi par cilvēka ķermeņa aizsardzību pret vides apdraudējumiem.

## 1.2. Darba galvenie uzdevumi

1. Darba sākotnējais uzdevums ir izveidot gaisa plūsmas skaitlisko modeli un analizēt gaisa plūsmas mijiedarbību vienkāršotā cilvēka ķermeņa modelī ar aizsargjaku, izmantojot *SolidWorks Flow Simulation*. Sākotnēji tiek izmantots ķermeņa un jakas apļveida modelis, lai pētītu gaisa plūsmas mijiedarbību un analizētu plūsmas spiedienu un ķermeņa virsmas temperatūru. Skaitliskajā modelī izmantots apvalks, kam ir trīs ieplūdes un 10 izplūdes atvērumi. Modelēšana tiek veikta arī *ANSYS*, lai salīdzinātu *SolidWorks* un *ANSYS* rezultātus un pārbaudītu rezultātu ticamību. Turklāt modelis ir pārveidots elipses formā, kas attēlo ķermeni un jaku.
2. Tiek pētītas un analizētas dažādas vienkāršas ventilācijas elementu formas, katru (pa vienam) piestiprinot pie ieplūdes ventilācijas atveres. Plūsmas spiediens un virsmas temperatūra tiek reģistrēta katrai ventilācijas elementu formai, lai novērtētu ventilācijas elementa efektivitāti. Analīze tiek veikta dažādiem gaisa ātrumiem (2 m/s, 5 m/s un 8 m/s), lai novērtētu gaisa ātruma ietekmi uz rezultātiem.
3. Tālāk tiek analizēta ventilācijas elementa sarežģītākā forma, mainot modeļa ģeometrisko izmēru, lai izpētītu plūsmas izmaiņas elementa plūsmas kanālā, izvērtējot izmēru izmaiņas ietekmi.
4. Kad ir atrasta ventilācijas elementa efektīvā forma, nākamais uzdevums ir optimizēt elementa dizainu. Elementa formas optimizācija tiek panākta, izveidojot metamodeli optimizācijas programmatūrā *KEDRO*, kur 12 punktu eksperimentu plāns (*DOE*) tika

izveidots, balstoties divās ventilācijas elementu ģeometriskās formas koordinātu vērtībās. Izmantojot šo *DOE*, ir izveidoti 12 ventilācijas elementa ģeometriskie modeļi, un katrs tika modelēts, izmantojot *CFD*, lai iegūtu spiediena un temperatūras atšķirību vērtības. Ierakstītās *CFD* vērtības tiek izmantotas *KEDRO* tālākai aproksimācijai, izmantojot *Kriging* metodi un optimizāciju.

### **1.3. Darba zinātniskā novitāte**

Promocijas darba zinātniskā novitāte ir metodoloģija par atbilstošu aizsargapģērba ventilācijas elementu izveidi, ko var piestiprināt pie ventilācijas atverēm, lai nodrošinātu pareizu gaisa cirkulāciju starp ķermeni un apģērbu, tādējādi novēršot ķermeņa pārkaršanu ekstremālos vides un lielas darba slodzes apstākļos. Lielākās daļas individuālo aizsargapģērbu ar ārējo dzesēšanas sistēmu galvenais trūkums ir tas, ka to konstrukcija ir apjomīga, tāpēc apģērbs ir smags un neērts valkāšanai. Turklāt to dzesēšanas efektivitāte nav stabila un uzticama personīgā apģērba dzesēšanas ierīcēm. Šos nelielos ventilācijas elementus var izmantot, lai novērstu šīs problēmas, jo tie ir ļoti viegli un to darbībai nav nepieciešama ārējā enerģija.

### **1.4. Darba praktiskā vērtība**

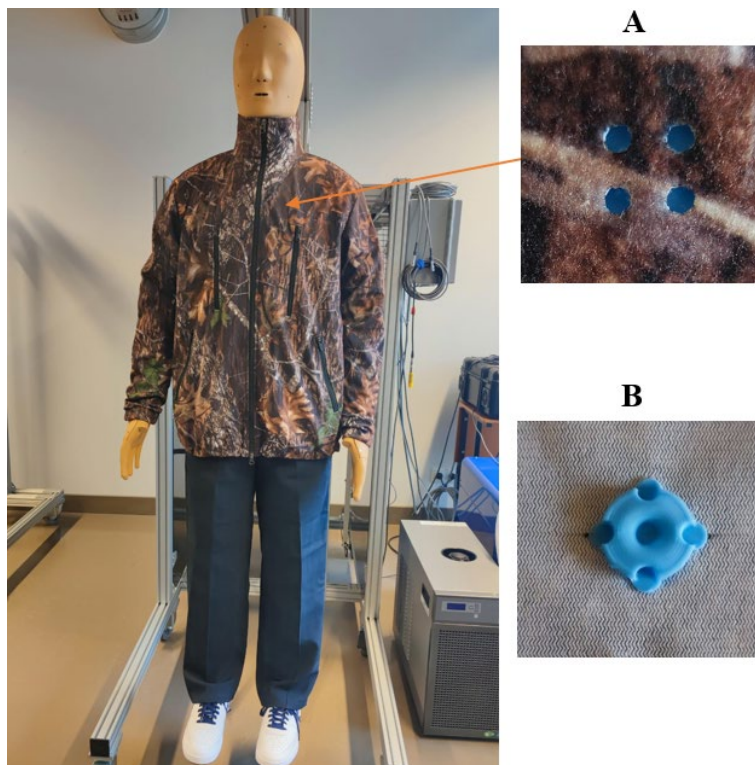
Ņemot vērā tirgū pieaugošo interesi par efektīvu cilvēka ķermeņa aizsardzību pret ārējās vides iedarbību, ir nepieciešami efektīvāki tehniskie risinājumi un materiāli, ko izmantot aizsargapģērba ārējā slānī, vienlaikus nodrošinot nepieciešamo ventilāciju arī siltos vides apstākļos un fiziskas slodzes laikā. Šādiem risinājumiem ir ļoti plašs praktiskais lietojums un pieprasījums pasaules tirgū. Turklāt pētījums sniedz arī vispusīgu izpratni par sarežģītu praktisku uzdevumu risināšanu, piemēram, ventilācijas elementu formas optimizāciju. Šī koncepcija var būt noderīga daudzos uzņēmumos praktisku uzdevumu risināšanai, piemēram, dažādu izstrādājumu dizaina optimizācijai.

### **1.5. Ventilācijas iestatīšanas piemērs modelim**

Eksperimenti ar termomanekena modeli notiek Rīgas Tehniskās universitātes (RTU) Individuālo aizsardzības līdzekļu (IAL) laboratorijā. Šo eksperimentu gaitā tiek izmantotas divas dažādas jakas: 1) parasta jaka bez ventilācijas funkcijām; 2) jaka ar pievienotiem ventilācijas elementiem.

1. attēlā redzams manekena modelis ar ventilējamu jaku. 1. A attēlā redzamas četras ventilācijas atveres jakas ārpusē, kas veido vienu ventilācijas vienību, savukārt 1. B attēlā – jakas iekšpuse, kurā redzams piestiprinātais ventilācijas elements, kas pozicionēts pie jakas ventilācijas caurumiem.

Šis eksperiments liecina par būtiskām ventilētās jakas priekšrocībām. Šie rezultāti patlaban vēl nav pievienoti, tie tiks publicēti pēc iespējas ātrāk pēc datu deklasificēšanas procedūras, proti, pēc industriālā sadarbības partnera patenta pieteikuma akceptēšanas (*European Patent Application No. 21816861.5 by Agris Gulevskis*).



1. att. Manekena modelis ar vēdināmo jaku: (A) palielināts ventilēšanas atveru skats; (B) pie ventilācijas caurumiem piestiprinātais ventilācijas elements.

## 1.6. Pētniecības metodes

Promocijas darbā minēto nepieciešamo rezultātu iegūšanai tika izmantotas šādas metodes:

- 1) *CAD* modelēšana;
- 2) *CFD* datorsimulācijas;
- 3) metamodelēšana;
- 4) fizikāls eksperiments.

## 1.7. Aprobācija

Promocijas darba rezultāti ir prezentēti un apspriesti starptautiskās konferencēs un zinātniskajos semināros.

1. 61. starptautiskā zinātniskā konference, Rīgas Tehniskā universitāte. 2020. gada 12.–14. oktobris, Rīga.
2. 20. starptautiskā zinātniskā konference “Inženierzinātnes lauksaimniecības attīstībai”, Latvijas Lauksaimniecības universitāte. 2021. gada 26.–28. maijs, Jelgava.
3. 62. starptautiskā zinātniskā konference, Rīgas Tehniskā universitāte. 2021. gada 12.–14. oktobris, Rīga.
4. 21. starptautiskā zinātniskā konference “Inženierzinātnes lauksaimniecības attīstībai”, Latvijas Lauksaimniecības universitāte. 2022. gada 25.–27. maijs, Jelgava.
5. 63. starptautiskā zinātniskā konference, Rīgas Tehniskā universitāte. 2022. gada 12.–14. oktobris, Rīga.
6. 22. starptautiskā zinātniskā konference “Inženierzinātnes lauksaimniecības attīstībai”, Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitāte. 2023. gada 24.–26. maijs, Jelgava.
7. 63. starptautiskā zinātniskā konference, Rīgas Tehniskā universitāte. 2023. gada 11.–13. oktobris, Rīga.

## 1.8. Publikācijas

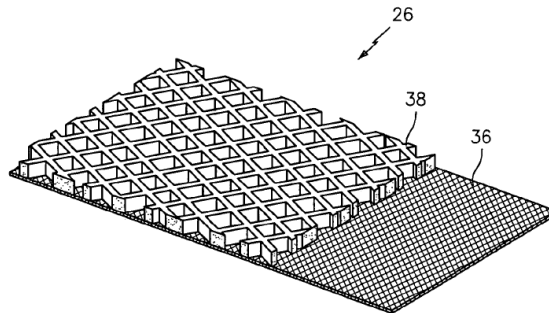
1. A. Janushevskis, J. V. Sanchaniya, S. R. Vejanand. Designing of Catamaran Hull Spine Beam. 20th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”. ISSN 1691-5976, Volume 20, pp. 1685–1691, Jelgava, 2021. <https://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2021/Papers/TF365.pdf>.
2. A. Janushevskis, S. R. Vejanand, A. Gulevskis. Comparative Analysis of Different Shape Ventilation Elements for Protective Clothing. 21th International Scientific Conference Engineering for Rural Development. ISSN 1691-5976. Volume 21, pp. 179–186. Jelgava, 2022. <https://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2022/Papers/TF052.pdf>.
3. A. Janushevskis, S. R. Vejanand, A. Gulevskis. Analysis of Different Shape Ventilation Elements for Protective Clothing. WSEAS Transactions on Fluid Mechanics, Volume 17, ISSN: 1790-5087, E-ISSN: 2225-347X, DOI: [10.37394/232013.2022.17.14](https://doi.org/10.37394/232013.2022.17.14), 2022. pp. 140–146. <https://wseas.com/journals/fluids/2022/a285113-338.pdf>.
4. A. Janushevskis, S. R. Vejanand, A. Gulevskis. Air Flow Analysis for Protective Clothing Ventilation Elements with and without Constant Cross-section Area Opening. Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. 60 (2), DOI: [10.2478/lpts-2023-0012](https://doi.org/10.2478/lpts-2023-0012), pp. 63–73, 2023. Published Online: 15 Apr 2023 Volume & Issue: Volume 60 (2023) – Issue 2 (April 2023). <https://sciendo.com/article/10.2478/lpts-2023-0012>.

5. A. Janushevskis, S. R. Vejanand, A. Gulevskis. Shape Optimization of Ventilation Elements for Protective Clothing by Using Metamodeling Approach. 22th International Scientific Conference Engineering for Rural Development. ISSN 1691-5976, Vol. 22, pp. 164–172, Jelgava, 2023. <https://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2023/Papers/TF032.pdf>.
6. Sanchaniya, J. V., Rana, V., & Vejanand, S. R. (2024). Optimization of Electrospinning Parameters for High-Strength Oriented Pan Nanofiber Mats. Latvian Journal of physics and technical sciences. (Accepted).
7. S. R. Vejanand, A. Janushevskis, I. Vaicis. Selection of Appropriate Criteria for Optimization of Ventilation Element for Protective Clothing Using a Numerical Approach. Computation 2024, 12, 90. <https://doi.org/10.3390/computation12050090>
8. S. R. Vejanand, A. Janushevskis, I. Vaicis. Analyzing the Efficiency of Ventilation Elements Used in Protective Clothing with Simplified Model. 23<sup>rd</sup> International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”, Jelgava, 2024. DOI: 10.22616/ERDev.2024.23.TF036

## 2. LITERATŪRAS APSKATS

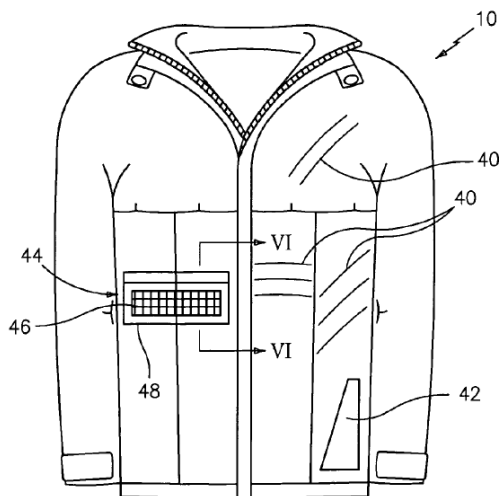
2. nodaļa veltīta īsam literatūras apskatam, sākot no apgērbu ventilācijas vēsturiskās attīstības un beidzot ar mūsdienu tehnoloģiskajiem sasniegumiem. Tajā uzsvērti arī vairāki ierobežojumi un trūkumi, kas saistīti ar apgērbu ventilāciju. Tehnoloģiju un materiālzinātnes attīstība ir veicinājusi jaunu ventilācijas funkciju radīšanu apgērbā ar mērķi uzlabot komfortu un regulēt ķermeņa temperatūru dažādos apstākļos. Tālāk tekstā sniegti daži piemēri.

### Sieta paneļi un ventilācijas sistēmas



2.1. att. Starplikas sieta audums: 26 – starplikas materiāla konstrukcija; 36 – plāns auduma slānis, 38 – biezs sieta struktūras slānis [3].

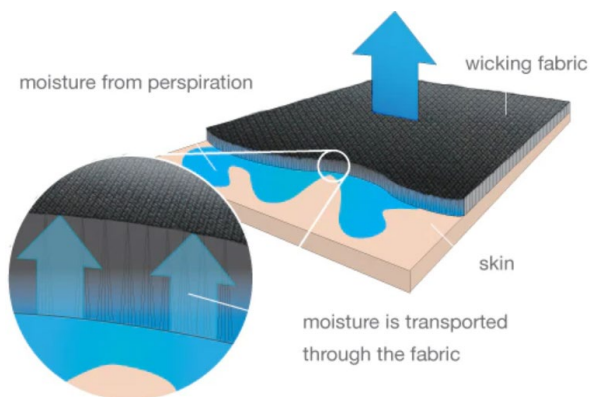
2.2. attēlā redzamas papildu iespējamās ventilācijas sistēmas versijas saskaņā ar izgudrojumu. Piemēram, šeit parādīta ventilācijas sistēmu platuma variācija US 7,043,767 B2 5 sporta jaka (10) ar vairākām spraugām līdzīgām ventilācijas sistēmām (40), kas izvietotas cita blakus citai un ko var izvietot kā vairākas ventilācijas sistēmas, piemēram, zem rokām, ķermeņa augšdaļā vai plecu rajonā. Perpendikulārajā variantā (42) starplikas materiāls ir veidots tuvināti ķīļa formai. Alternatīvā ventilācijas sistēma (44) attēlota sporta jakas (10) kreisajā pusē (2.2. att.). Elastīgais trīsdimensiju veidā sašūtais distancējošais materiāls iestrādāts apgērbā virsmā kā plakans, piemēram, sloksnei līdzīgs elements (46), kas piešūts pie pārējā apgērbas materiāla malas. Atloks (48) novietots virs šī areālā elementa (46) un var to nosegt [3].



2.2. att. Jaka ar ventilācijas sistēmu, kas satur sieta audumu [3].

### Mitrumu izvadoši audumi

Apģērbu inženierija ir attīstījies, un viens no būtiskiem atklājumiem ir mitrumu aizvadošo materiālu izstrāde. Šādus materiālus plaši izmanto sporta un āra apģērbos, kur svišana izraisa lielu diskomfortu [4].

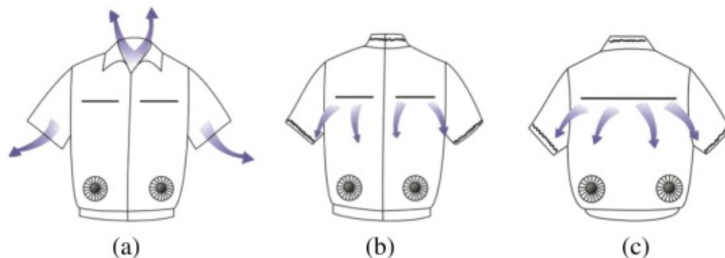


2.3. att. Mitrumu aizvadošs audums [5].

### Aktīvās dzesēšanas metodes

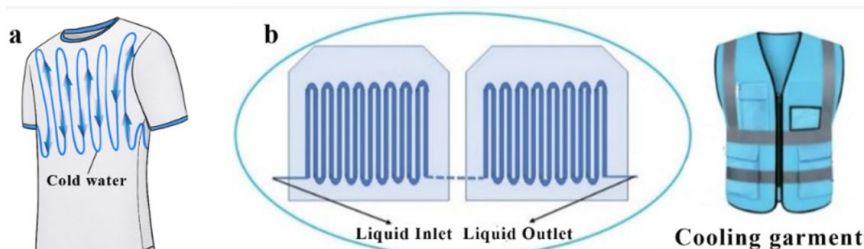
Daži jauninājumi ir ne tikai dabiskās ventilācijas risinājumi, bet arī piespiedu dzesēšanas risinājumi. Piemēram, dažos specializētos apģērbos ir iebūvēti ventilatori (gaisa dzesēšana),

dzesēšanas paketes vai šķidrums dzesēšanas sistēmas, pa kurām ap ķermeni aktīvi cirkulē vēss gaiss vai šķidrums, lai atvēsinātu ādu [6].



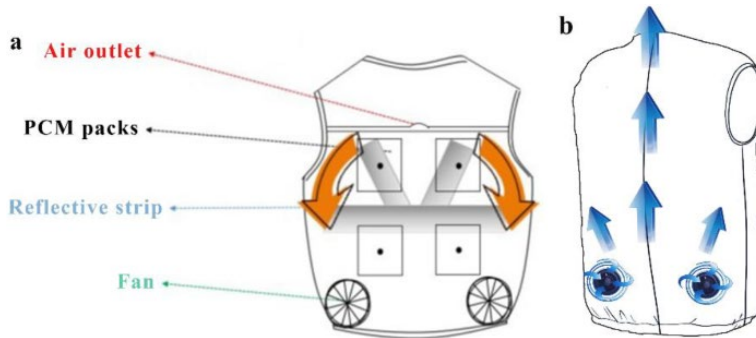
2.4. att. Ventilējamas jakas ar ventilatoriem un dažādām atverēm. (a) Parasts atvērums; (b) priekšējais atvērums; (c) aizmugurējais atvērums. [6].

Kā redzams 2.5. attēlā, šķidrums dzesēšanas apģērbi parasti ir aprīkoti ar cirkulējošām ūdens caurulēm, kas piepildītas ar aukstu šķidrumu, un mikrosūkņa ierīci iekšējā slānī, kas virza šķidrums plūsmu caurulē, lai samazinātu temperatūru [8, 9]. Pēc vairākiem pētījumiem ir pierādīts, ka šķidrās dzesēšanas apģērbi (*LCG*) ir viena no daudzsoļākajām tehnoloģijām apģērba dzesēšanas jomā, un tā tiek izmantota dažādās jomās, tostarp militārajā [10], kalnrūpniecības [11] un sporta [12] jomā.



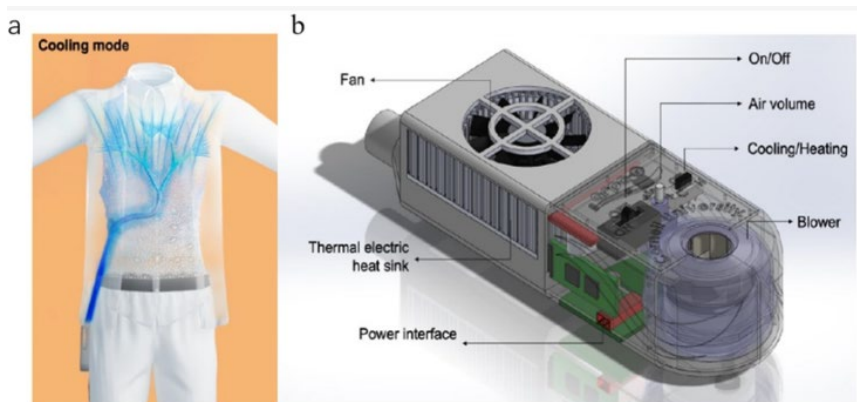
2.5. att. Šķidrās dzesēšanas sistēma. (a) Šķidrās dzesēšanas apģērba shēmas; (b) šķidrās dzesēšanas apģērbs ar termoelektrisku (TE) ierīci [7, 13].





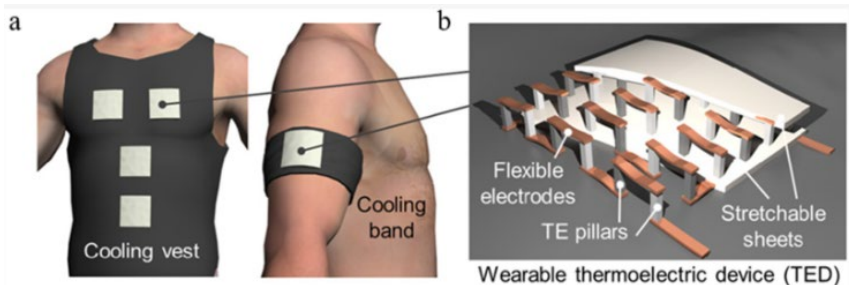
2.6. att. Gaisa dzesēšanas metode. (a) Gaisa dzesēšana ar *PCM* dzesēšanas vesti (*PCV*) [14]; (b) gaisa dzesēšanas apgēriba shematisks attēls [13].

2.6. a attēlā redzama *Ni et al.* [15] izstrādātā jaunā hibrīda individuālā dzesēšanas veste (*PCV*). Unikālā *PCV* ir apvienota ar *PCM* un ventilācijas ventilatoriem, demonstrējot šī hibrīda dzesēšanas apgēriba pielāgojamību un uzticamību. Fāzes maiņas materiālu (*PCMs*) dzesēšanai var izmantot ķermeņa vai vides siltumu tiešā veidā, lai samazinātu mikroklimata temperatūru starp apgērbu un ķermeni, neizmantojot papildu enerģiju [16]. Balstoties gaisa caurulišu tīklā un *TE* dzesēšanas plāksnēs, *Lou et al.* pētīja sakarību starp dzesēšanas efektu un dažādām ķermeņa pozīcijām, kas ir noderīgi, lai uzlabotu dzesēšanas sistēmas un apgēriba kombināciju efektīvā un vienkāršā veidā ikdienas dzīvē [17].



2.7. att. Termoelektriskā (*TE*) dzesēšana. (a) *TE* dzesēšanas modelis; (b) *TE* dzesēšanas moduļa ilustrācija [18, 13].

Gaisa dzesēšanas un šķidruma dzesēšanas apgērbi ir neērti un smagi, ar lielparāta gaisa vai šķidruma caurulēm, un to dzesēšanas efektivitāte nav stabila un uzticama individuālo apgērbu dzesēšanas ierīcēm [19].

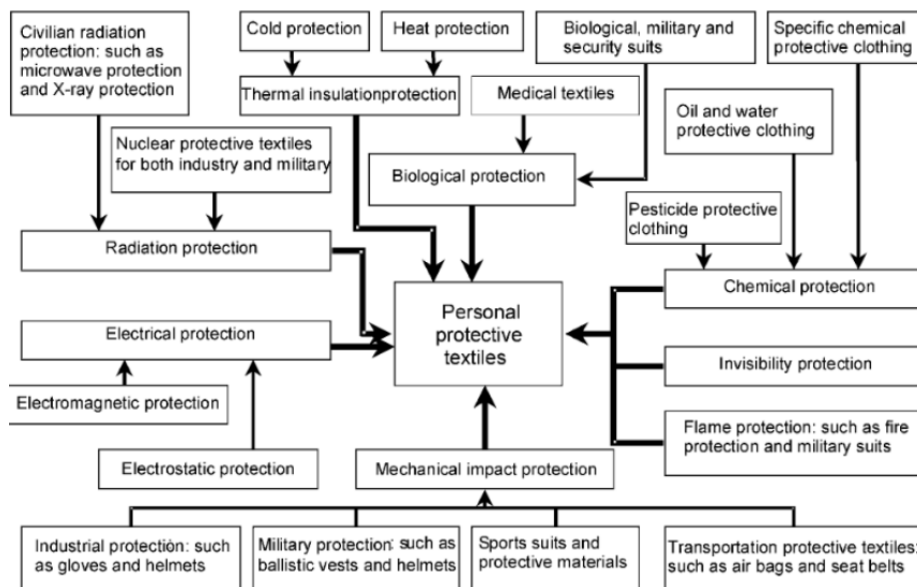


2.8. att. Termoelektriskā ierīce (*TED*); (a) dzesēšanas apģērbs ar valkājamām TE ierīcēm (*TED*); (b) *TED* struktūra [20, 13].

Kā redzams 2.8. attēlā, *Hong* un citi ir radījuši elastīgu un pārnēsājamu termoelektrisku dzesētāju ar mērogojamu lietojumu [21]. Lai palielinātu siltumvadītspēju, neorganisko pusvadītāju termoelektriskās plāksnes tika uzstādītas uz divām elastīgām elastīgām *Ecoflex* plēvēm, kas bija piepildītas ar siltumvadošo pildvielu – alumīnija nitrīdu. Šī ierīce var darboties nepārtraukti astoņas stundas bez radiatora un nodrošina vairāk nekā 7,6 °C dzesēšanas efektu [13]. *Zhang et al.* iepazīstināja ar valkājamu *TEC*, kura pamatā ir divslāņu elastīgs sildelements [22], kas izgatavots no hidrogēla un niķeļa putuplasta kā fāzes maiņas materiāla, lai absorbētu siltumu, un termiski vadoša materiāla, lai vadītu siltumu.

Lielākās daļas individuālo aizsargapģērbu ar ārējo dzesēšanas sistēmu galvenais trūkums ir tas, ka tie padara konstrukciju apjomīgu, savukārt apģērbu – smagu un neērtu valkāšanai. Turklāt to dzesēšanas efektivitāte nav stabila un uzticama personīgo apģērbu dzesēšanas ierīcēm. Tādēļ šajā jomā ir nepieciešami modernāki tehnoloģiskie risinājumi.

Šajā nodaļā sniegta arī detalizēta aizsargapģērbu klasifikācija, aprakstot dažādus apģērbu veidus, kas paredzēti konkrētiem mērķiem. Katra apģērba galvenais mērķis ir pasargāt cilvēka ķermeni no nelabvēlīgiem laikapstākļiem. Termins “aizsargapģērbs” tiek lietots, ja apģērbs ir īpaši izstrādāts, lai nodrošinātu aizsardzību pret tādiem apdraudējumiem kā uguns, vējš, mikroorganismi, ķīmiskās vielas, gāze, radiācija, elektrība u. c. [23]. Aizsargapģērba priekšmeti nodrošina praktisku mērķi, piemēram, individuālais aizsargapģērbs, kura galvenais mērķis ir pasargāt cilvēka ķermeni no nelabvēlīgiem vides faktoriem, tostarp fizikāliem, ķīmiskiem, bioloģiskiem un termiskiem apdraudējumiem [24].



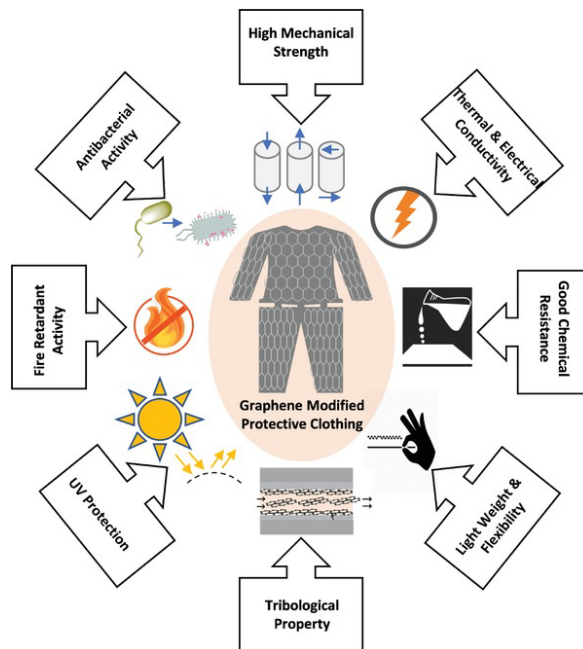
2.9. att. Aizsargapģērbu klasifikācija [25].

Lai pasargātu sevi no iespējamiem apdraudējumiem, ir svarīgi izvēlēties piemērotu aizsargapģērbu atkarībā no apdraudējuma veida [26]. Tomēr lielākās daļas individuālo aizsardzības līdzekļu (IAL) problēma ir tā, ka lielāku drošību var garantēt tikai uz lielāku izdevumu un fiziska diskomforta rēķina, kas ietver samazinātu elastību, precizitāti, komfortu un redzamību [27]. Papildu riski, kas saistīti ar tradicionālajiem IAL, ietver karstuma izraisītu sasprindzinājumu, kustību ierobežojumus, nelaimes gadījumu risku, krampjus, fizioloģiskas problēmas un trauksmi [28].



2.10. att. Aizsargtērpa piemēri [24].

Grafēns ir divdimensiju loksne, kas sastāv no oglekļa atomiem, kas savienoti plakanā izkārtojumā. Tas ir plaši atzīts par revolucionāru materiālu dažādās tehnoloģiju jomās, pateicoties tā izcilajām mehāniskajām, termiskajām, ķīmiskajām, elektriskajām un antibakteriālajām īpašībām [29]. Tā izcilās īpašības padara to par pievilcīgu materiālu ar potenciālu dažādiem tehniskiem lietojumiem, piešķirot tam priekšrocības, salīdzinot ar citiem līdzīgiem materiāliem [30]. Grafēna vai tā atvasinājumu integrēšana polimēros/tekstilmateriālos var uzlabot audumu īpašības konkrētam lietojumam [31].



2.11. att. Ar grafēnu uzlabots aizsargapģērbs ar daudzfunkcionālām īpašībām [29].

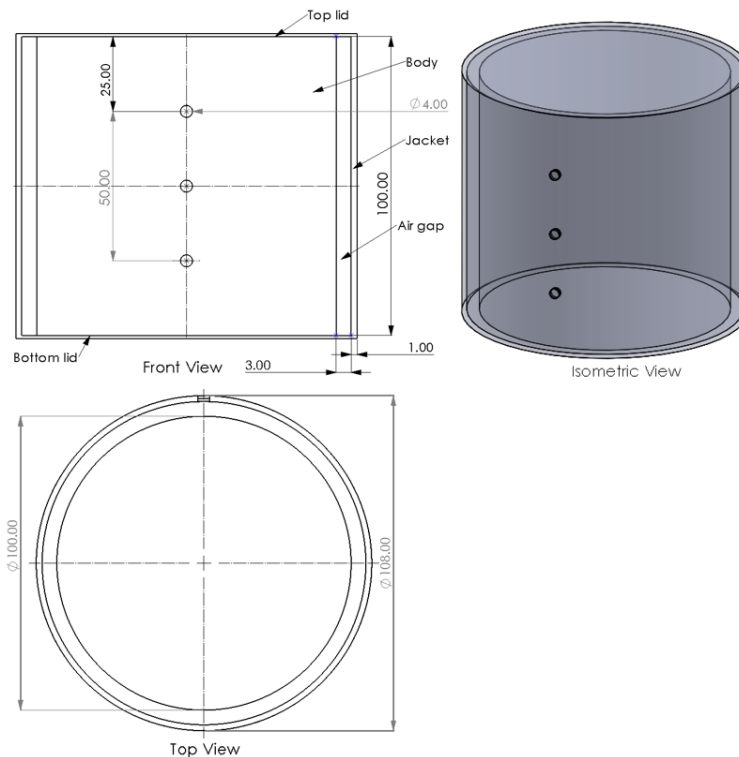
Visbeidzot, šajā nodaļā ir sniegta visaptveroša informācija par tādiem jautājumiem kā apģērba izolācija un cilvēka termokomforts. Tajā aplūkota arī gaisa plūsmas modelēšana, kā arī paņēmieni rezultātu aproksimācijai un optimizēšanai.

## 2.1. Literatūras apskata secinājumi

1. Galvenie trūkumi lielākajai daļai individuālo aizsargapģērbu ar ārējo dzesēšanas sistēmu ir tas, ka tie padara struktūru apjomīgu, kas padara apģērbu smagu un neērtu valkāšanā.
2. To dzesēšanas efektivitāte nav vienmērīga un uzticama personīgo apģērbu dzesēšanas ierīcēm. Tas prasa progresīvākus tehnoloģiskos risinājumus šajā jomā.
3. Jāizstrādā jauni tehniski risinājumi, lai uzlabotu apģērbu ventilāciju un komfortu.
4. Šajā nodaļā ir sniegta visaptveroša informācija par tādiem jautājumiem kā apģērba izolācija un cilvēka ķermeņa siltuma komforts. Tajā aplūkota arī skaitļošanas fluīdu dinamikas (CFD) izmantošana skaitliskajai simulācijai, kā arī paņēmieni rezultātu aproksimēšanai un optimizēšanai.

### 3. PĒTĪTĀ OBJEKTA (APĢĒRBA) ANALĪZE UN FLUĪDA PLŪSMAS MODELIS. *SOLIDWORKS* PLŪSMAS SIMULĀCIJA

Lai analizētu un izprastu gaisa plūsmas mijiedarbību, tiek izmantots vienkāršs cieta korpusa un apvalka cilindrisks modelis. Shematiskais modelis redzams 3. attēlā. Šajā gadījumā modeļa izmēri ir izvēlēti nejauši, jo galvenais mērķis ir izprast plūsmas mijiedarbības procesu un izpētīt gaisa mijiedarbību ar modeli.

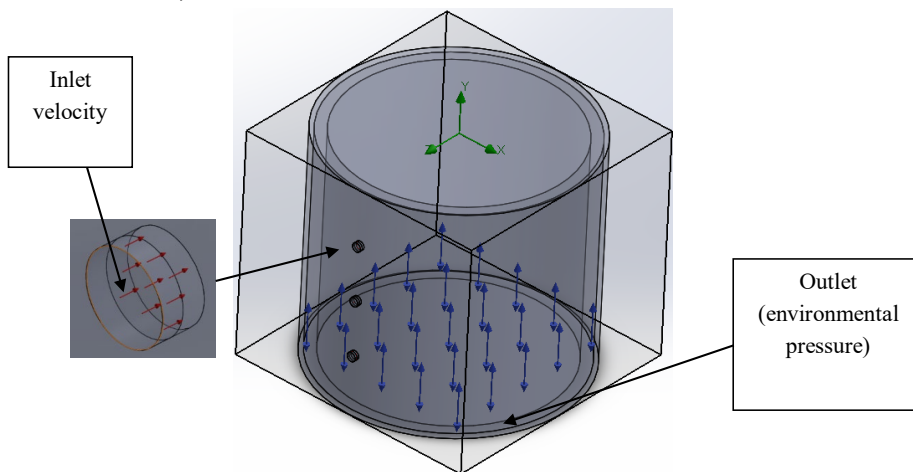


3. att. Cilindriskā modeļa shematiskā diagramma.

#### 3.1. Ventilācijas modeļa robežnosacījumi

Siltuma vadīšanas un konvekcijas modeļēšanai tiek ņemts vērā fizikālais laiks – 1 sekunde. Fizikālais laiks tiek izvēlēts mazāks, lai ietaupītu aprēķina laiku. Pētījumā kā plūsma tiek definēts gaiss ar laminārām un turbulentām īpašībām. Nākamais solis ir izvēlēties uzdevuma sākotnējos robežnosacījumus. Uzdevumam tiek izmantots ieplūdes gaisa ātrums 5 m/s. Modelī ir trīs ieplūdes ventilācijas atveres ar diametru 4 mm, savukārt izplūde ir definēta apakšējai robežvirsmi kā apkārtējās vides spiediens (3.1. att.). Tiek ņemta vērā gaisa temperatūra 20 °C un spiediens 101325 Pa. Modeļa augšdaļa tiek uzskatīta par hermētisku, kas nozīmē, ka gaiss var iekļūt tikai

caur modeļa apakšējo daļu. Ieplūdes ātrums pie ventilācijas atverēm ir parādīts ar sarkanām bultiņām, izplūde ar vides spiedienu – ar zilu bultiņu (3.1. att.). Ķermeņa siltuma ģenerēšanas ātrums tiek uzskatīts par 200 W normālas staigāšanas apstākļos [32]. Vidējā ķermeņa temperatūra tiek uzskatīta – 36,5 °C.



3.1. att. Aprēķinu domēns ar sākuma nosacījumiem (cilindriskis modelis).

Šajā plūsmas simulācijas pētījumā tiek izmantots tīklojuma izmērs ( $N_x = 28$ ,  $N_y = 24$ ,  $N_z = 28$ ), jo smalkāka tīklojuma izmantošana ievērojami palielina skaitļošanas laiku. Modelis tiek izmantots, lai iegūtu rezultātus plūsmas spiedienam un ķermeņa virsmas temperatūrai. Plūsmas spiedienu aprēķina gaisa spraugā starp apvalku un korpusu, kad gaiss izkļūst caur ventilācijas atverēm. Otrs uzdevuma parametrs ir ķermeņa virsmas temperatūra, lai novērtētu ventilācijas ietekmi uz virsmas temperatūru.

Ir svarīgi arī sākotnējā posmā saprast un pārbaudīt iegūto rezultātu ticamību. Lai pārbaudītu rezultātu ticamību, tiek izmantota programmatūra *ANSYS*, lai veiktu to pašu analīzi, izmantojot vienu un to pašu modeli un robežnosacījumus. Rezultātu salīdzinājums apkopots 3.1. tabulā.

3.1. tabula

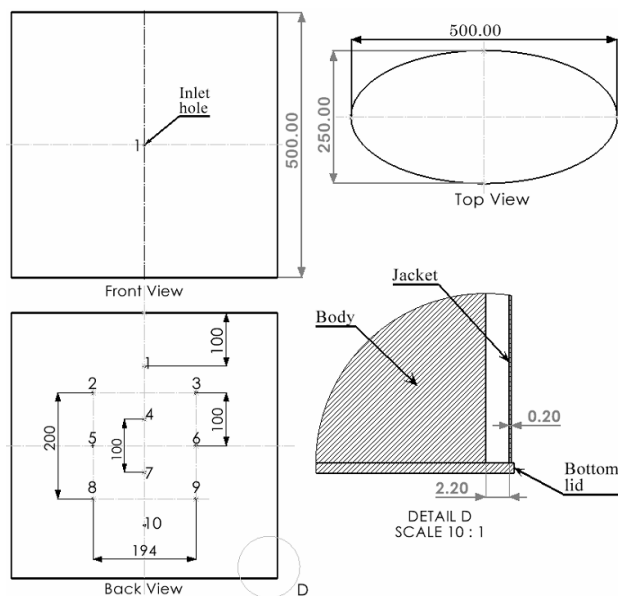
*SolidWorks* un *ANSYS* skaitlisko rezultātu salīdzinājums

	Spiediens [Pa]			Ķermeņa virsmas temperatūra [°C]		
	Minimums	Maksimums	$\Delta P$	Minimums	Maksimums	$\Delta T$
<i>ANSYS</i>	101323,29	101340,14	16,85	31,13	36,74	5,61
<i>SolidWorks</i>	101324,47	101341,11	16,64	31,39	36,76	5,37

3.1. tabulā  $\Delta P$  un  $\Delta T$  attiecīgi attiecas uz spiediena starpību un temperatūras starpību. Sasniegtais spiediena diapazons ir ļoti tuvs ar nelielām izmaiņām. Arī *ANSYS* iegūto virsmas temperatūras vērtību diapazons ir tuvs *SolidWorks* iegūtajam. Rezultātu atšķirības attiecībā uz  $\Delta P$  ir 1,25 %,  $\Delta T$  – 4,37 %, kas ir pieļaujamās kļūdas robežās, jo atšķirība ir mazāka par 5 %.

### 3.2. Dažādu vienkāršu ventilācijas elementu formu analīze

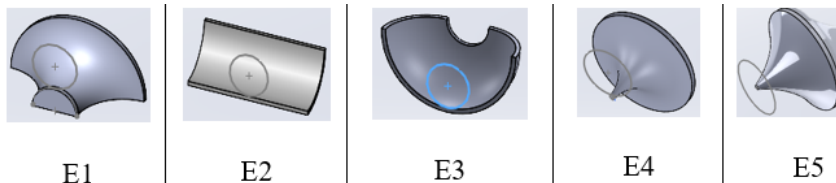
3.2. apakšnodaļa ietver dažādu vienkāršu un sarežģītu ventilācijas elementu formu detalizētu analīzi. Lai vienkāršotu šī uzdevuma problēmu, ir izveidots jakas un ķermeņa elipses formas modelis. Centrā tiek definēts cilvēka ķermenis, tam pievienota jaka, saglabājot nemainīgu 2,2 mm atstarpi starp tiem. 3.2.1. attēlā redzams modeļa shematiskais zīmējums. Jakai ir viens ieplūdes ventilācijas caurums ar diametru 2 mm priekšpusē un 10 izplūdes atveres ar diametru 4 mm aizmugurē.



3.2.1. att. Eliptisks ķermeņa un jakas modelis.

Šajā pētījumā tiek izmantoti pieci dažādi ventilācijas elementi, lai pārbaudītu un salīdzinātu katras formas efektivitāti. 3.2.2. attēlā redzama katra ventilācijas komponenta forma un nomenklatūra. Ventilācijas elementa novietojums attiecībā pret apvalka ieplūdes atveri ir apzīmēts ar apļveida simbolu (3.2.2. att.). Elementa E4 un E5 formas ir apļveida, taču tām ir dažādi izliekumi. Galvenā atšķirība ir tā, ka E4 ir pievienots tangenciāli ieplūdes atverei, savukārt E5 ir pievienots koncentriski ieplūdes atverei.





3.2.2. att. Dažādas vienkāršas ventilācijas elementu formas.

Pētījums tiek veikts ar ieplūdes gaisa ātrumu 2 m/s, 5 m/s un 8 m/s. Simulācijas pētījumā jakai un ķermenim tiek piešķirti atsevišķi materiāli ar specifiskām materiāla īpašībām. Analīzē ir ņemtas vērā tādas pašas materiāla īpašības kā apvalkam visiem ventilācijas elementiem. Šo materiālu īpašības apkopotas 3.2. tabulā. Uzdevuma robežnosacījumi ir tādi paši kā aprakstīts 3.1. apakšnodaļā.


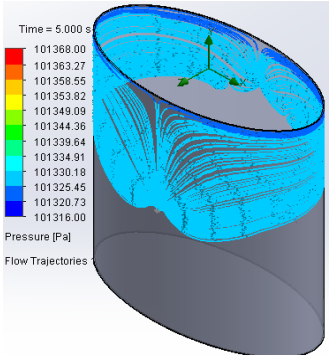
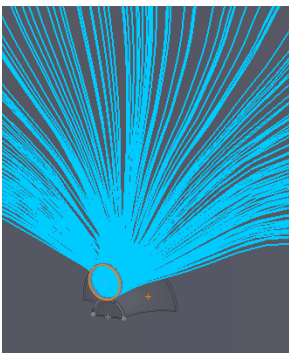
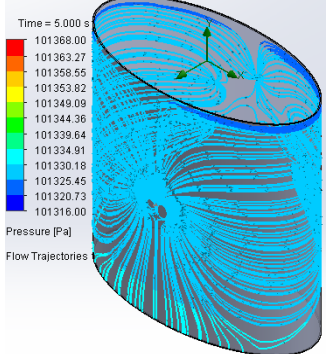
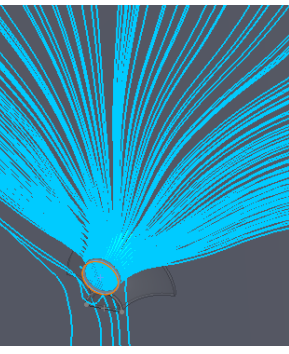
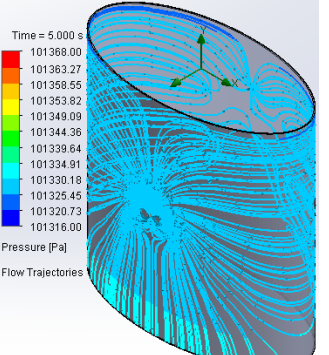
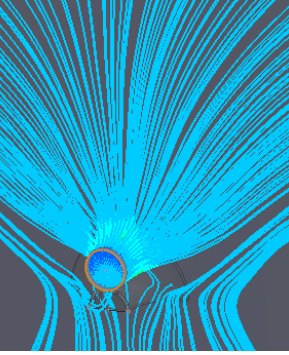
3.2. tabula

Materiāla īpašības [33, 34]

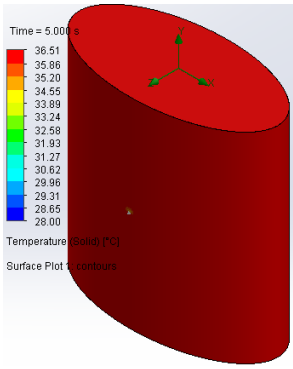
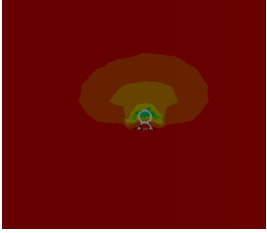
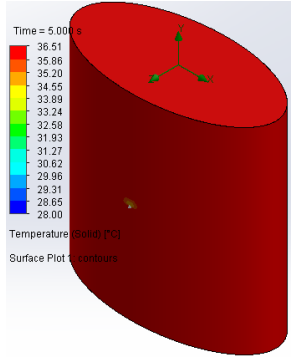
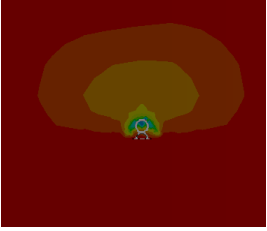
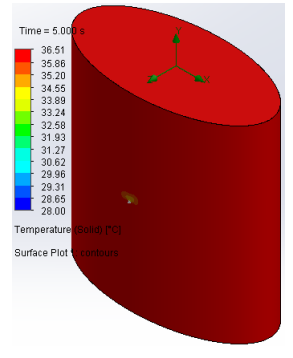

Materiāla īpašība	Cilvēka ķermenis	Jaka
Vidējais blīvums [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	985	1420
Īpatnējais siltums [ $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ ]	3600	1140
Siltumvadītspēja [ $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ]	0,21	0,261

## Rezultāti

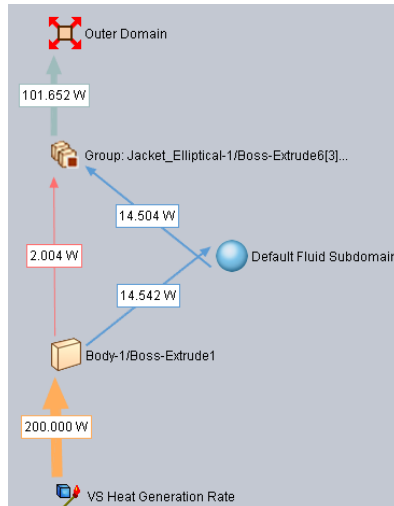
Rezultāti tiek apskatīti fizikālajā laikā 5 sekundes. Turklāt iegūto rezultātu atšķirība katram elementam jebkurā konkrētā laikā būtu gandrīz vienāda, tāpēc, lai samazinātu skaitļošanas laiku, pētījumam tiek izvēlēts mazāks fiziskais laiks – 5 sekundes. Šis uzdevums ietver piecu dažādu elementu salīdzinošo analīzi.

Elements	Ātrums [m/s]	Spiediena sadalījums [Pa]	
E1 	2		
	5		
	8		

3.2.3. att. Plūsmas spiediena sadalījums E1.

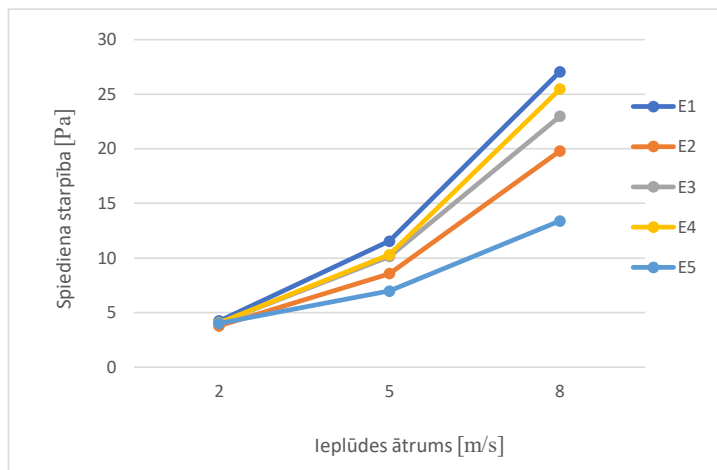
Ātrums [m/s]	Virsmas temperatūras sadalījums [°C]	
2		
5		
8		

3.2.4. att. Korpasa virsmas temperatūra E1.

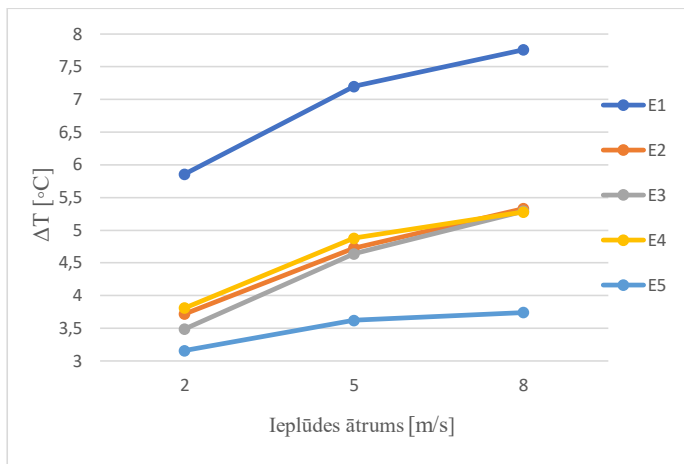


3.2.5. att. Plūsmas aprēķina diagramma E1 pie 2 m/s.

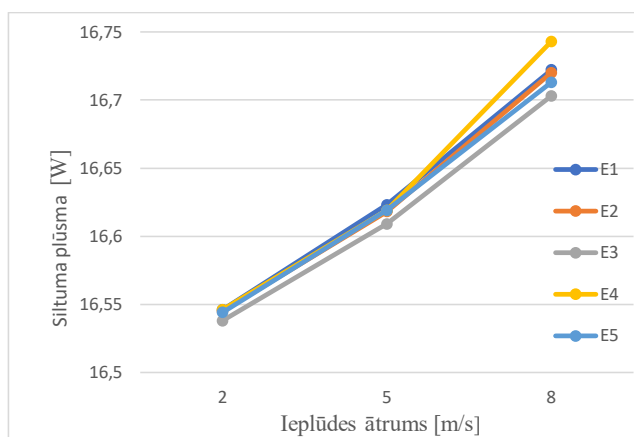
Kā redzams 3.2.5. attēlā, plūsmas diagrammas tiek izmantotas, lai aprēķinātu siltuma pārnese ātrumu katrā gadījumā. Kā redzams 3.2.3. līdz 3.2.5. attēlā, plūsmas spiediena, virsmas temperatūras un siltuma plūsmas vērtības tiek iegūtas katram no pieciem ventilācijas elementiem, un rezultāti tiek salīdzināti. Rezultātu salīdzinājums ir parādīts 3.2.6.–3.2.8. attēlā.



3.2.6. att. Spiediena starpība atkarība no ātruma.



3.2.7. att. Virsmas temperatūras starpība ( $\Delta T$ ) pret ātrums.

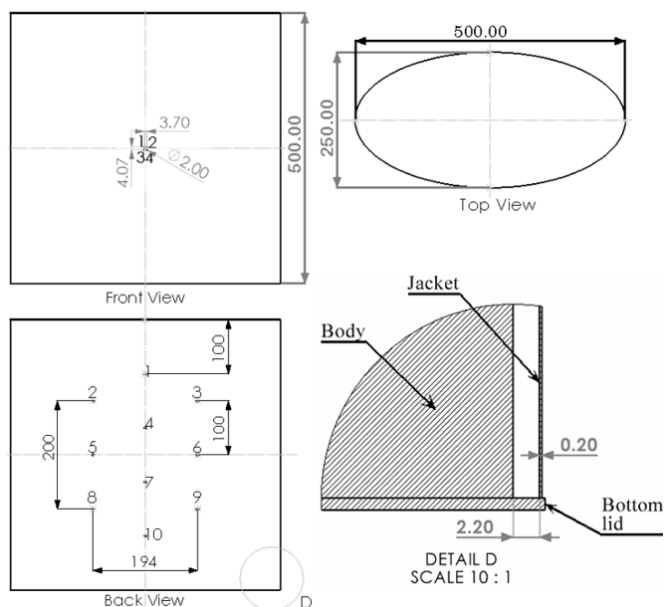


3.2.8. att. Siltuma plūsma pret ātrums.

No rezultātu analīzes redzams arī tas, ka elements E5 nodrošina zemāko spiediena starpību un mazākus enerģijas zudumus ieplūdes plūsmas kanālā nekā citi uzdevumā minētie elementi. Mazāka spiediena starpība nodrošina vienmērīgāku plūsmu visā sistēmā un mazākas plūsmas svārstības, un, ja ir mazākas plūsmas svārstības, arī enerģijas zudumi ir nelieli, kas nodrošina labāku sistēmas dzesēšanu. Turklāt E5 piedāvā pakāpeniskāku temperatūras atšķirību pie dažādiem ieplūdes ātrumiem, kā rezultātā gaisa svārstību dēļ ir mazākas temperatūras svārstības. Ņemot vērā visus rezultātus un analīzes punktus, no visiem šajā pētījumā minētajiem ventilācijas elementiem vispiemērotākais ir elements E5, kas varētu nodrošināt labāku ķermeņa dzesēšanu un komfortu. Ja

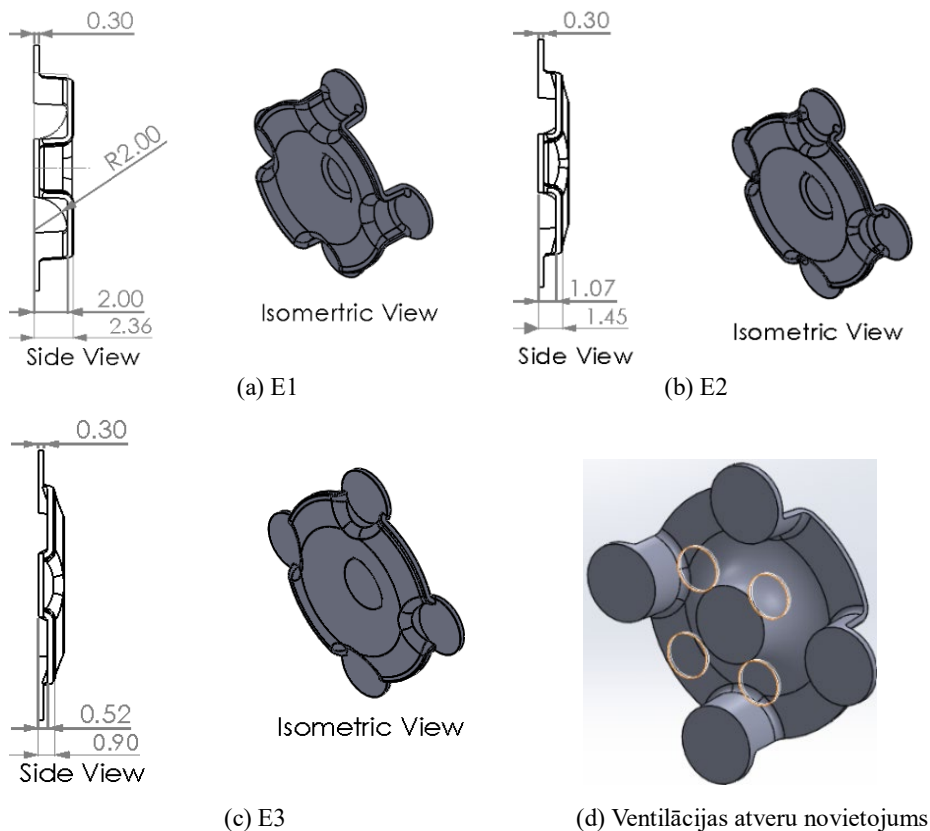
ir lielākas temperatūras svārstības pie dažādiem gaisa ātrumiem, tas vienā punktā var izraisīt augstāku temperatūru, savukārt citā – zemāku, kas var radīt diskomfortu organismā. Ņemot vērā visus rezultātus un analīzes punktus, no visiem šajā pētījumā minētajiem ventilācijas elementiem vispiemērotākais ir elements E5, kas varētu nodrošināt labāku ķermeņa dzesēšanu un komfortu.

### 3.3. Sarežģītas formas ventilācijas elementu salīdzinošā analīze



3.3.1. att. Elipsveida modeļa dizains ar vienu ventilācijas elementu, kas sastāv no četrām ventilācijas atverēm.

Pētījumā tiek izmantots tas pats elipsveida modeļa dizains, kas minēts iepriekšējā pētījumā, galvenā atšķirība šeit ir tā, ka priekšpusē ir četras ieplūdes ventilācijas atveres ar diametru 2 mm, kas veido vienu ventilācijas elementu, un 10 izplūdes atveres ar 4 mm diametru jakas aizmugurē. Modeļa shematiskais zīmējums redzams 3.3.1. attēlā.



3.3.2. att. Trīs dažādas ventilācijas elementa ģeometriskās dimensijas.

Simulācijas pētījums tiek veikts ar tādiem pašiem robežnosacījumiem un materiāla īpašībām, kā minēts iepriekšējā pētījumā, novietojot katru ventilācijas elementu, kā redzams 3.3.2. attēlā. Šie ventilācijas elementi tiek novietoti vienlaikus, rezultāti tiek reģistrēti salīdzināšanai.

No iegūtajiem rezultātiem var secināt, ka mazākam ieplūdes ātrumam 2 m/s ir piemērotāks elements E1, taču tas uzrāda lielāku spiediena starpību un enerģijas zudumus šūnas plūsmas kanālā pie lielāka ieplūdes ātruma 5 m/s. Ņemot vērā kopējo veiktspēju pie mazāka un lielāka ieplūdes ātruma, elements E2 ir piemērotāks nekā citi uzdevumā minētie elementu dizaini, kas nodrošina zemāko spiediena starpību un mazākos plūsmas enerģijas zudumus elementa plūsmas kanālā, kas varētu nodrošināt labāku dzesēšanu. Šis pētījums parāda, ka ir svarīgi izvēlēties pareizos elementa atvērums izmērus, jo ļoti mazi izmēri var nodrošināt lielāku spiediena starpību un lielāks atvērums izmērs var nodrošināt augstāku temperatūras starpību, savukārt pareiza izmēra izvēle starp tiem var uzlabot veiktspēju. Pareizu izmēru izvēle var būt grūts uzdevums, taču to var panākt, veicot pareizu optimizāciju un simulācijas izpēti. Vienlaikus izstrādātie modeļi ir izmantojami ventilācijas

efektivitātes salīdzinošai analīzei, kas ļaus turpināt pētījumus, piemēram, par vairāku ventilācijas elementu izvietojuma punktu optimizāciju uz aizsargapgārbu.

### **3.4. Dažādu formu ventilācijas elementu analīzes secinājumi**

1. No rezultātu analīzes 3.2. apakšnodaļā ir redzams, ka elements E5 nodrošina zemāko spiediena starpību un mazākus enerģijas zudumus ieplūdes plūsmas kanālā nekā citi pētījumā minētie elementi. Mazāka spiediena starpība nodrošina vienmērīgāku plūsmu visā sistēmā un mazākas plūsmas svārstības, un, ja ir mazākas plūsmas svārstības, arī enerģijas zudumi ir nelieli, kas nodrošina labāku sistēmas dzesēšanu.
2. No iegūtajiem rezultātiem 3.3. apakšnodaļā var secināt, ka mazākam ieplūdes ātrumam 2 m/s ir piemērotāks elements E1, taču tas uzrāda lielāku spiediena starpību un enerģijas zudumus šūnu plūsmas kanālā pie lielāka ieplūdes ātruma 5 m/s. Tas ir svarīgs punkts, kas jāņem vērā, jo daži elementi var darboties labi ar mazāku ātrumu, bet var nenodrošināt labu veiktspēju pie lielāka ātruma, tāpēc ir svarīgi izvēlēties pareizo elementu atbilstoši darba parametriem.
3. Ņemot vērā kopējo veiktspēju pie mazāka un lielāka ieplūdes ātruma, elements E2 ir piemērotāks par citiem pētījumā minētajiem elementu dizainiem, kas nodrošina zemāko spiediena starpību un mazākos plūsmas enerģijas zudumus šūnas plūsmas kanālā, kas varētu nodrošināt labāku dzesēšanu.
4. Pamatojoties uz rezultātu analīzi 3.4. apakšnodaļā, var secināt, ka elements E1 kopumā nodrošina labākus rezultātus gan pie mazāka, gan lielāka gaisa ātruma. Turklāt E1 nodrošina mazākos enerģijas zudumus elementa plūsmas kanālā un uzrāda mazākas spiediena un temperatūras starpības svārstības, mainoties gaisa ātrumam, nekā citi minētie elementi. Tas padara elementu E1 piemērotāku par citiem minētajiem elementiem, kas varētu nodrošināt labāku dzesēšanu pie dažādiem ieplūdes gaisa ātrumiem.

## **4. PĒTNIECĪBAS OBJEKTA (APĢĒRBA) MODEĻA MODELĒŠANAS IEVADES DATU VEIDOŠANA**

### **4.1. Ventilācijas elementa formas optimizācijas uzdevuma formulējums**

Galvenais 4.1. apakšnodaļas mērķis ir noteikt elementa ģeometrisko formu, kas līdz minimumam samazina plūsmas enerģijas zudumus šūnas plūsmas kanālā, kā to parāda spiediena starpība. Lai sasniegtu optimālus rezultātus, tika īstenota daudzpakāpju pieeja:

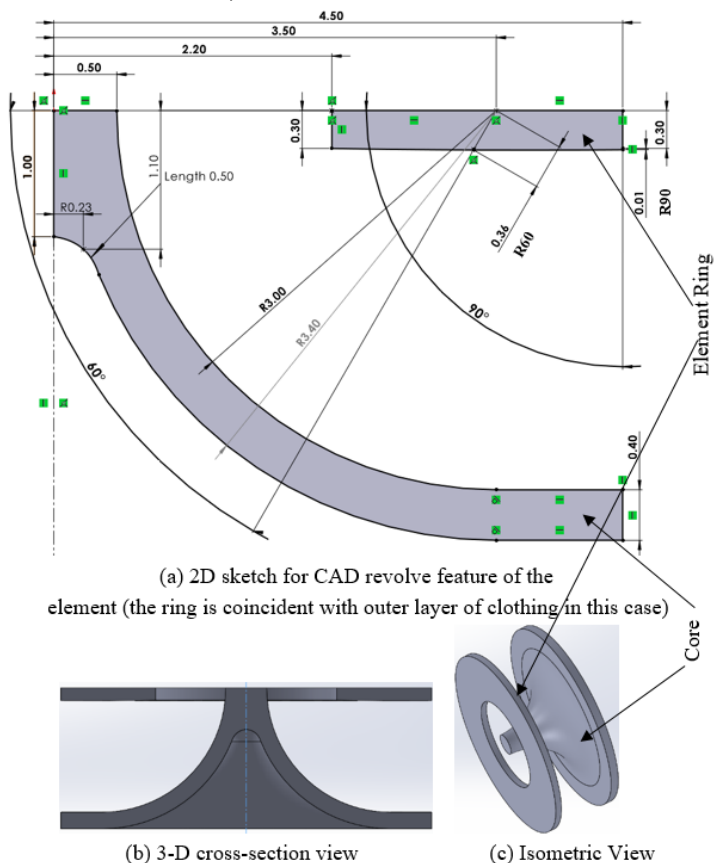
1. atbalsta punktu izvietojuma stratēģiska noteikšana nevienmērīgiem racionāliem B-splainiem (*NURBS*), lai iegūtu elementus ar gludu formu;
2. ģeometrisko modeļu konstruēšana, izmantojot *SolidWorks*, saskaņā ar eksperimentu plānu;



3. visaptveroša modeļa atbilžu aprēķināšana, izmantojot (CAE) programmatūru (*SolidWorks Flow Simulation*);
4. atbilžu metamodeļu izveide, kas iegūti datoreksperimentā;
5. metamodeļa izmantošana elementa formas optimizācijai;
6. optimālās formas elementa atbilžu validācija pilnajam modelim, izmantojot (CAE) programmatūru.

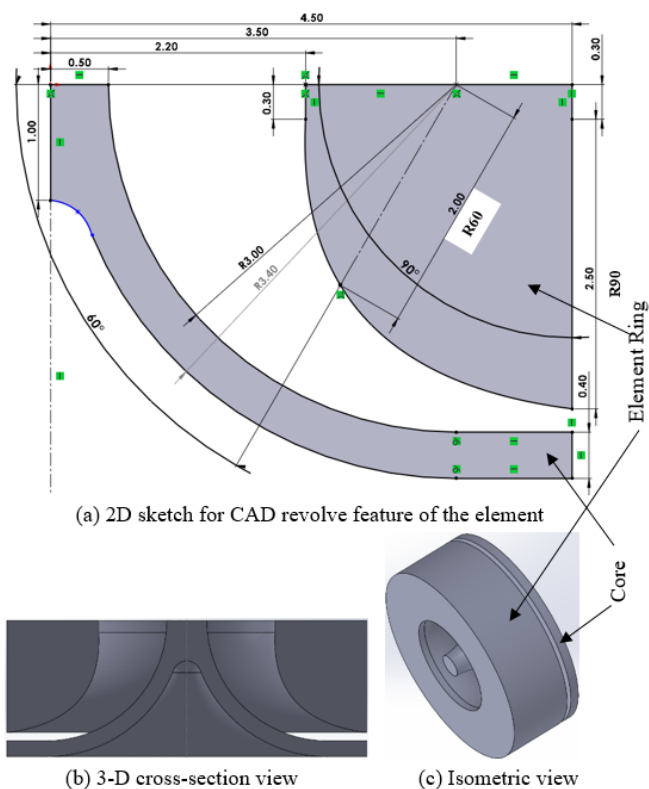
Divi projektēšanas mainīgie lielumi – taisno līniju garums R60 un R90 – ir attēloti ar definētajām apakšējām un augšējām robežām, kā redzams 4.1.1. un 4.1.2. attēlā.

Šo līniju apakšējie galapunkti ( $0,36 \leq R60 \leq 2$ ;  $0,01 \leq R90 \leq 2,5$ ) kalpo kā atbalsta kontrolpunkti *NURBS*, kas nosaka ventilācijas elementa ārējā gredzena gludo formu. Metamodeļa konstruēšanai izmanto vidējā kvadrātiskā attāluma latīņu hiperkuba (*MSDLH*) eksperimenta plānu diviem faktoriem, kā redzams 4.1.3. attēlā.



4.1.1. att. Ventilācijas elementa CAD modelis ar konstrukcijas mainīgo apakšējām robežām.

4.1.1. un 4.1.2. attēlā redzams elementa gredzena mazākais un lielākais izmērs. 4.1.3. attēlā – eksperimenta plāns (*DOE*) ar 12 skaitliskajām optimizācijas parametru vērtībām noteiktā diapazonā. Šajā *DOE* faktori  $X1 = R60$  un  $X2 = R90$  attēlo elementu gredzena koordinātas, kur  $R60$  atbilst punktiem  $60^\circ$  leņķī,  $R90$  – punktiem  $90^\circ$  leņķī attiecībā pret horizontālo asi 2D skicē.

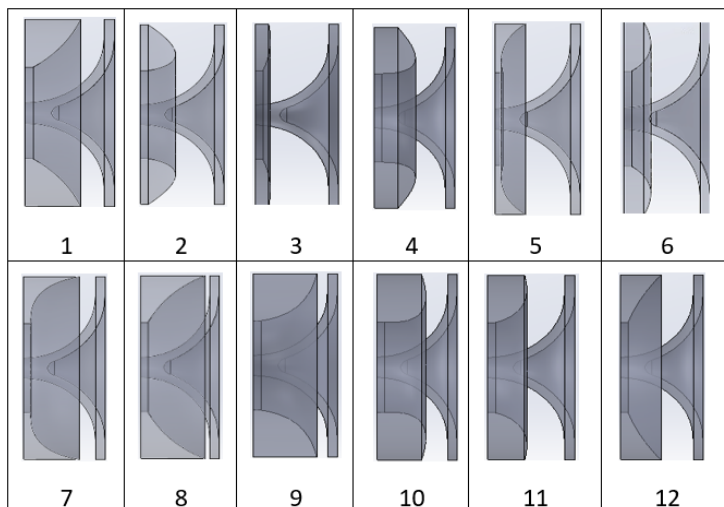


4.1.2. att. Ventilācijas elementa *CAD* modelis ar konstrukcijas mainīgo augšējām robežām.

Input Factor Values by Experimental Design		
Total No. of Runs= 12 Factors= 2		
Factor_N_1_to_2		
Mne-	X 1	X 2
monic	R60	R90
Levels	12	12
Min	0.36	0.01
Max	2	2.5
1)	1.25454545454545	1.82090909090909
2)	1.55272727272727	0.01
3)	0.65818181818181	0.236363636363637
4)	1.85090909090909	0.68909090909090
5)	0.36	0.91545454545454
6)	1.10545454545455	0.46272727272727
7)	0.50909090909090	2.04727272727273
8)	0.95636363636363	2.5
9)	1.70181818181818	2.27363636363636
10)	2	1.59454545454545
11)	1.40363636363636	1.14181818181818
12)	0.80727272727272	1.36818181818182

4.1.3. att. *MSDLH DOE* ar 12 izmēģinājumiem diviem faktoriem, ko ģenerē *KEDRO*.

Izmantojot šo *DOE*, ar *SolidWorks* palīdzību tiek ģenerēti 12 elementu ģeometriskie modeļi. Simulācijā izmantotais modelis ir tāds pats kā 3.2. apakšnodaļā aprakstītais, vienīgā atšķirība ir gaisa spraugas starp korpusu un apvalku palielināšana no 2,2 mm līdz 3,4 mm. Tas ir tāpēc, ka šajā aprēķinā izmantotā ventilācijas elementa augstums ir 3,4 mm.

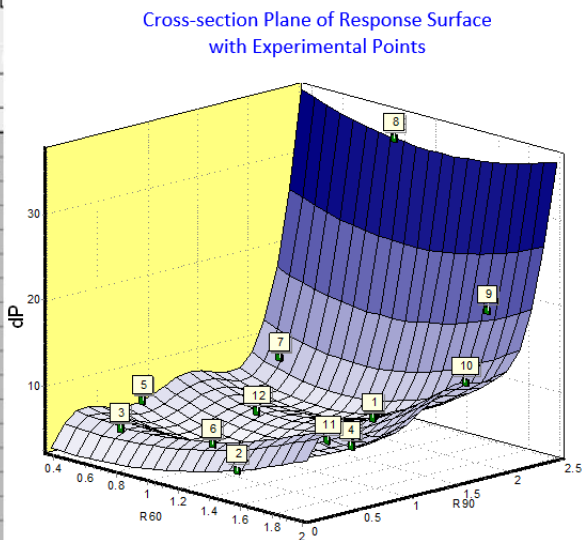


4.1.4. att. 12 elementu ģeometriskie modeļi, kas konstruēti, izmantojot *DOE*.

## Rezultāti

Pēc visu ievades parametru un robežnosacījumu iestatīšanas, kā minēts iepriekšējā nodaļā, tiek veikta plūsmas modelēšana, kur aprēķina laiks ir 5 sekundes. Pēc tam rezultāti tiek novērtēti plūsmas spiediena un virsmas temperatūras izteiksmē. No iegūtajiem rezultātiem tiek aprēķināta spiediena starpība ( $\Delta P$ ) un temperatūras starpība ( $\Delta T$ ) visiem 4.1.4. attēlā minētajiem 12 elementiem. Aprēķinātās  $\Delta P$  un  $\Delta T$  vērtības tiek izmantotas kā ievades dati *KEDRO* turpmākai aproksimācijai un optimizācijai. 4.1.5. un 4.1.6. attēlā simbols  $dP$  attiecas uz  $\Delta P$ ,  $dT$  – uz  $\Delta T$ .

Functions Yt:	dP	dT
Sigma Cross	4.526287	0.225006
Sigma Cross%	52.529536%	46.762349%
R2 adjusted		
F-Crit 99%		
Sigma	0.000000	0.000003
Sigma%	0.000001	0.000727
MeanExpValue	10.370000	7.048333
STDev of Exp	8.616651	0.481170
Exp. Range	28.960000	1.850000
MaxError	0.000000	-0.000008
Bad Point No.	11	12
Max Rel Error	0.00%	0.00%
BadRelPointNo.	11	12
Max Cook Dist.		
Suspicious point	0	0
No. of Actual Exp	12	12
Filtered STD		



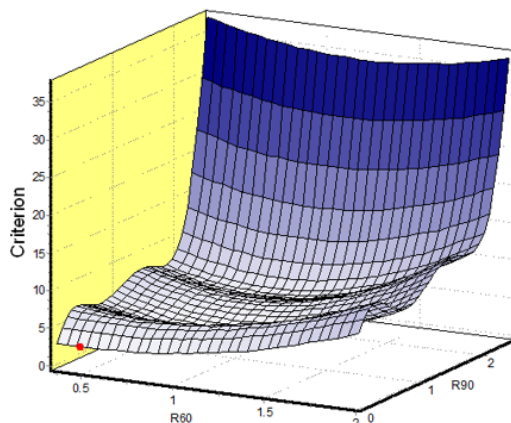
4.1.5. att. Atbildes virsma  $dP = f(R60, R90)$ , izmantojot eksperimentu ar 12 izmēģinājumiem Kriging aproksimācijai vēja ātruma gadījumā 4 m/s.

4.1.5. attēlā redzama Kriging aproksimācijas atbildes virsma ar norādītiem eksperimentālajiem punktiem. Aproksimācijas kvalitātes pārbaudei ir divi galvenie rādītāji: *Sigma Cross%* un maksimālā relatīvā kļūda. Šeit *Sigma Cross* ir krosvalidācijas kļūda, savukārt *Max Rel Error* – maksimālā relatīvā kļūda (attiecībā pret eksperimentālajām vērtībām). Aproksimācijas kvalitāte būs ļoti zema, ja *Sigma Cross%* vērtība būs tuva vai lielāka par 100%. Mazāka *Sigma Cross%* vērtība nodrošinās labāku aproksimāciju. Aproksimācija tiek uzskatīta par labāku arī tad, ja *Max Rel Error* procentuālā vērtība ir mazāka vai tuva nullei. *Sigma Cross%* 52,52% un *Max Rel Error* 0,001% šajā gadījumā liecina par pieņemamu tuvinājuma līmeni.

### Cross-section Plane of Criterion Surface

Set Range for X<sub>i</sub>, Y<sub>i</sub>, F<sub>i</sub> and Click ColorBox to Visualize Active Constraint!

Indices No	Opt	Min	Max
1) X1: R60	0.501114	0.36	2
2) X2: R90	0.01	0.01	2.5
3) Y1: dP	2.88669	0	0
4) Y2: dT	8.79647	0	0
5) F1	0.501114	0	0
6) F2	0.01	0	0



4.1.6. att. Optimizācijas rezultāti pie vēja ātruma 4 m/s (sarkanais punkts norāda  $dP$  globālo minimumu).

Optimizācijas rezultāti pēc minimālās spiediena starpības kā kritērija ir redzami 4.1.6. attēlā. Iegūtie rezultāti ir pārbaudīti, izmantojot plūsmas simulācijas pētījumu, kas veikts pie iepļūdes ātruma 4 m/s. Pēc tam rezultāti tiek izmantoti aproksimācijai un optimizācijai, atkārtojot to pašu procesu.

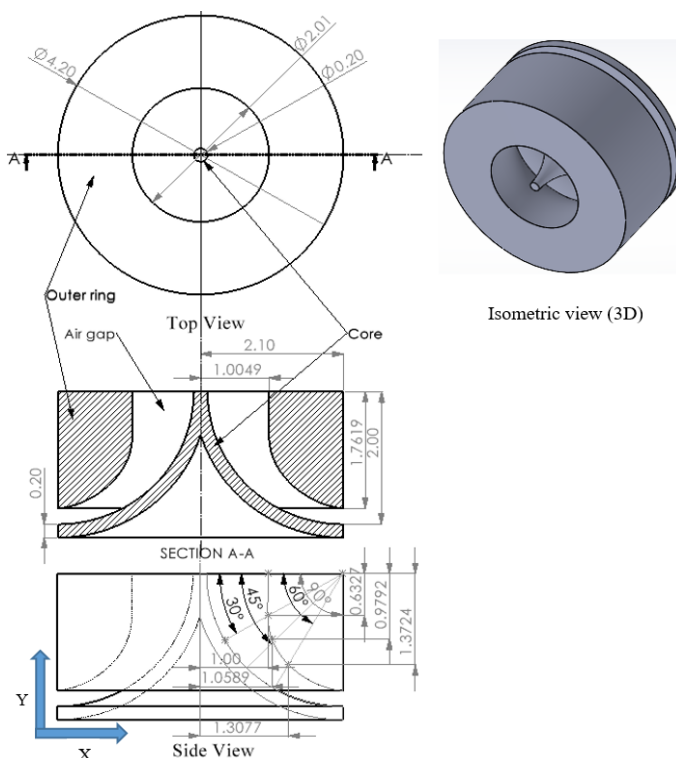
Konkrēti optimālie konstrukcijas punkti elementu gredzenam tika noteikti, pamatojoties uz minimālās spiediena starpības kritērijiem pie vēja ātrumiem 4 m/s un 8 m/s. Ļoti neliela atšķirība tika novērota arī iegūtajās optimālo aprēķina punktu vērtībās pie 4 m/s un 8 m/s. R90 koordinātu vērtība abos gadījumos paliek nemainīga, savukārt R60 – nedaudz atšķiras. Metamodeļa aproksimācijas rezultātu kvalitāte pie 8 m/s bija labāka, pamatojoties uz iegūtajām *Sigma Cross%* vērtībām. No iegūtajiem rezultātiem var secināt, ka optimālie elementu gredzena konstrukcijas mainīgie var nodrošināt minimālu spiediena starpību un labāku dzesēšanu. Optimālajos konstrukcijas punktos gredzens praktiski nepastāv, kas liecina, ka vislabākos rezultātus nodrošinās elements bez ārējā gredzena. Pētījums parāda, ka metamodelēšanas pieejas izmantošana ar *CFD* simulāciju var ievērojami samazināt optimizācijai nepieciešamo skaitļošanas laiku.

## 4.2. Ventilācijas elementa analīze ar nemainīgu šķērsriezuma laukuma atvēršanu un bez tā

4.2. apakšnodaļā ir aprakstīta ventilācijas elementa konstrukcija ar nemainīgu šķērsriezuma laukumu  $3,14 \text{ mm}^2$ , ieskaitot ārējo gredzenu. Darbā analizēti pieci atšķirīgi modeļi, no kuriem četri ietver dažādas ārējā gredzena un serdes koordinātu vērtības, savukārt piektais scenārijs ietver

ventilācijas elementu bez ārējā gredzena. Ventilācijas elementa konstrukcijas efektivitāte ir novērtēta, analizējot un salīdzinot visu piecu modeļu rezultātus. Šie ventilācijas elementi ir piestiprināti pie ventilācijas atveres aizsargapvalka iekšējā pusē. Mērķis ir noteikt elementa ģeometrisko konfigurāciju, kas nodrošina vismazākos enerģijas zudumus elementa plūsmas kanālā, ko parāda spiediena starpība. Enerģijas zudumi plūsmā palielinās, palielinoties spiediena starpībai ( $\Delta P$ ), un, plūsmai mazinoties vai zaudējot enerģiju, samazinās ķermeņa dzesēšana. Šajā darbā tiek izmantots tāds pats eliptiskas formas ķermeņa un apvalka modelis, kā aprakstīts 3.2. apakšnodaļā. Rezultātu iegūšanai tiek izmantoti arī tie paši robežnosacījumi. Simulācijas pētījums tiek veikts pie trīs dažādiem ieplūdes gaisa ātrumiem – 2 m/s, 5 m/s un 8 m/s.

Ir četri ventilācijas elementu modeļi ar ārējo gredzenu ar nosaukumiem E0-30, E0-45, E0-60 un E0-90, piektais gadījums sastāv no serdeņa bez ārējā gredzena, ko sauc par E1. 4.2.1. attēlā redzama elementa E0-90 konstrukcija ar serdi un ārējo gredzenu. Visos ventilācijas elementu projektēšanas gadījumos izmantotās koordinātu vērtības norādītas 4.2. tabulā. Visi minētie izmēri ir milimetros.



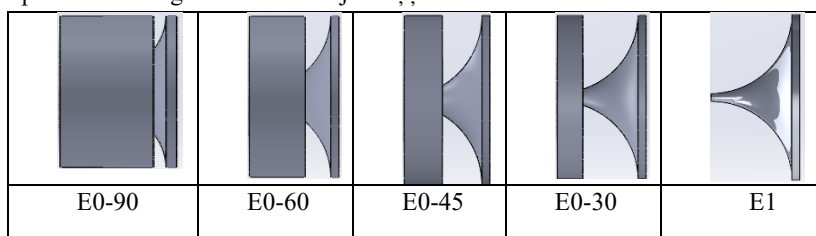
4.2.1. att. Elementa E0-90 konstrukcija.

4.2. tabula

Elementu koordinātu vērtības

$\alpha$	X1	Y1	X2	Y2	S
0°	1,0049	0	0,1	0	3,14
30°	1	0,6327	0,3679	1	
45°	1,0589	0,9792	0,6857	1,4140	
60°	1,3077	1,3724	1,1	1,7320	
90°	2,10	1,7619	2,1	2	

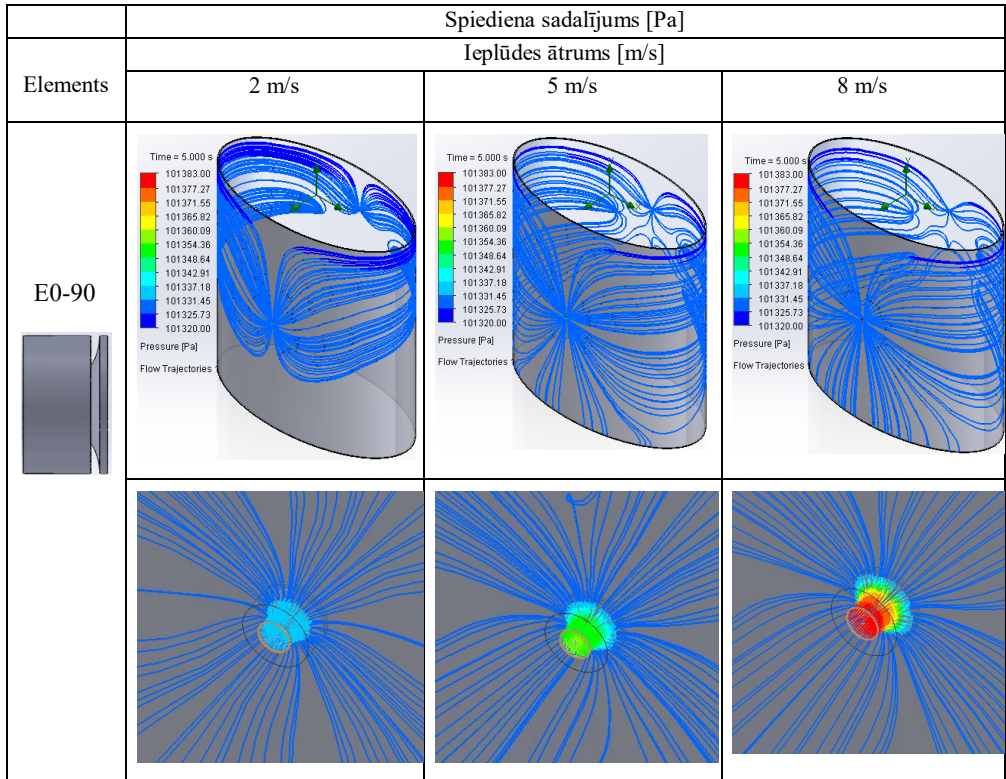
4.2. tabulā simbols  $\alpha$  apzīmē atskaites koordinātu leņķi no 0° līdz 90°. Gredzena koordinātas apzīmētas ar X1 un Y1, serdes koordinātas – ar X2 un Y2. Ar S apzīmētas nemainīgas gaisa spraugas šķērsriezuma laukumu elementā. Tāpēc šķērsriezuma laukums starp serdi un ārējo gredzenu paliek nemainīgs visos norādītajos leņķos.



4.2.2. att. Ventilācijas elementi

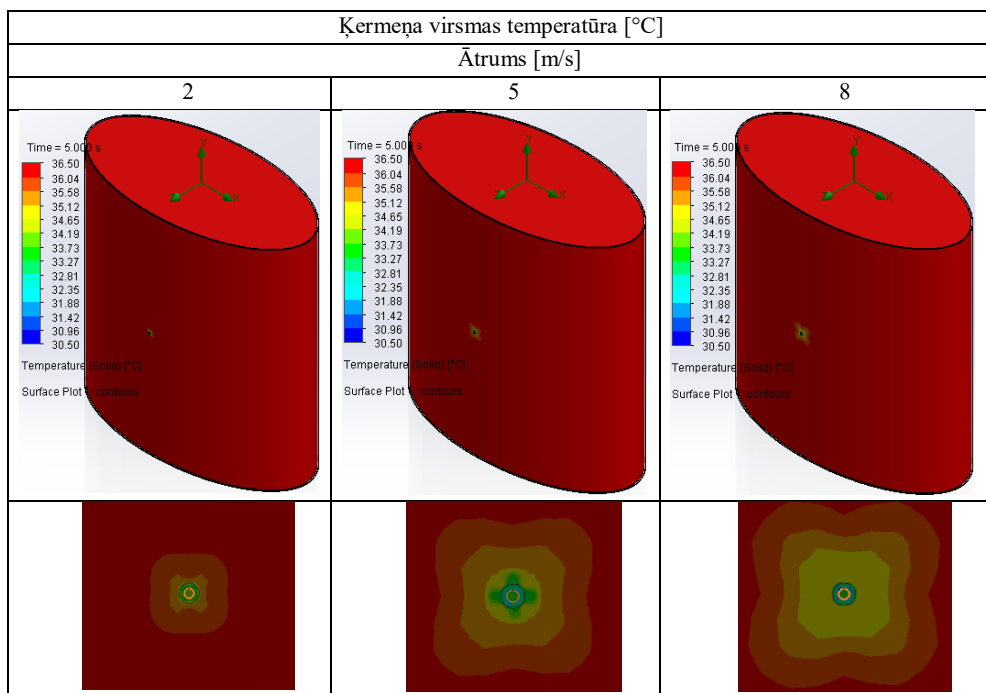
### Rezultātu analīze

Rezultātu analīze tiek veikta, pamatojoties uz to pašu koncepciju, kas aprakstīta 3.2. apakšnodaļā.



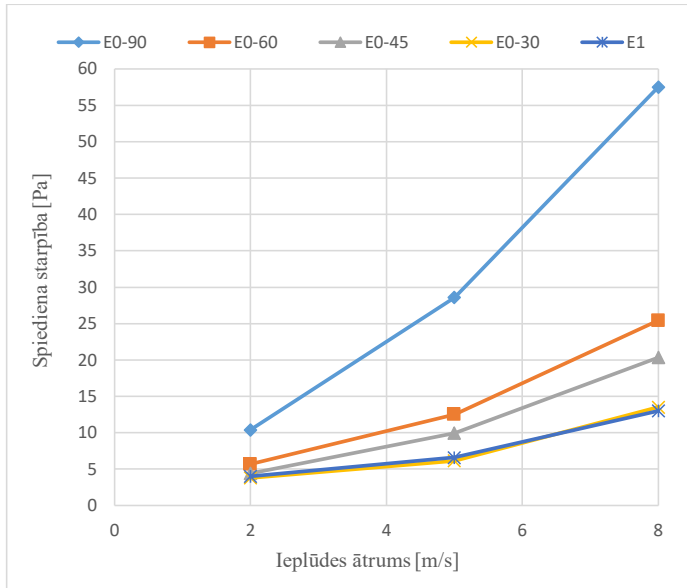
4.2.3. att. E0-90 plūsmas spiediena sadalījums.



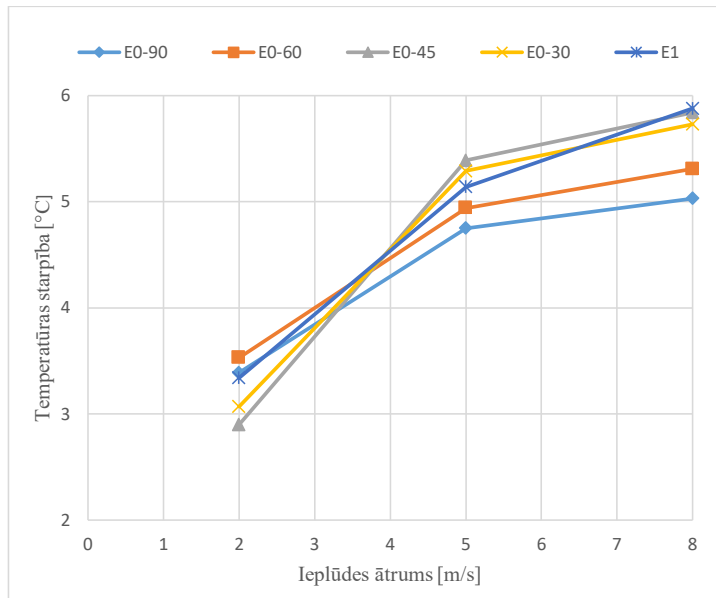


4.2.4. att. Elementa E0-90 virsmas temperatūras sadalījums.

Līdzīgi kā 4.2.3. un 4.2.4. attēlā, tiek aprēķinātas pārējo ventilācijas elementu plūsmas spiediena un virsmas temperatūras vērtības un salīdzināti rezultāti. Rezultātu salīdzinājums redzams 4.2.5. un 4.2.6. attēlā.



4.2.5. att. Spiediena starpība pie dažādiem gaisa plūsmas ātrumiem.



4.2.6. att. Temperatūras starpība pie dažādiem gaisa plūsmas ātrumiem.

Aplūkojot 4.2.6. attēlu, redzams, ka pie 2 m/s ātruma elementiem E0-60 un E0-90 ir vislielākās temperatūras atšķirības. Tomēr, ja ātrums ir 5 m/s un 8 m/s, abiem elementiem ir vismazākā temperatūras starpība. Tas nozīmē, ka E0-60 un E0-90 var nodrošināt labāku dzesēšanas efektivitāti, ja gaisa plūsmas ātrums ir neliels, bet tie ir mazāk efektīvi, ja ieplūdes ātrums ir lielāks. E0-60 un E0-90 elementiem ir lielāki enerģijas zudumi un spiediena atšķirības, kas palielinās, palielinoties ātrumam. Tas liecina par šo elementu zemu efektivitāti. Attiecībā uz elementiem E0-45 un E0-30, abiem ir vismazākā temperatūras starpība pie ātruma 2 m/s, savukārt lielākā starpība pie 5 m/s. Tas liecina, ka tie, iespējams, nav īpaši efektīvi pie mazāka ātruma, bet var nodrošināt labākus rezultātus pie lielākiem gaisa plūsmas ātrumiem. E1 ir elements, kas uzrāda konsekventu un labāku veiktspēju gan pie mazāka, gan lielāka ieejas ātruma. Tas ir saistīts ar to, ka E1 uzrāda vismazākos enerģijas zudumus plūsmas kanālā pie visiem minētajiem ātrumiem. Ņemot vērā visus minētos rezultātus, var secināt, ka elements E1 kopumā nodrošina labākus rezultātus gan pie mazāka, gan lielāka gaisa plūsmas ātruma.

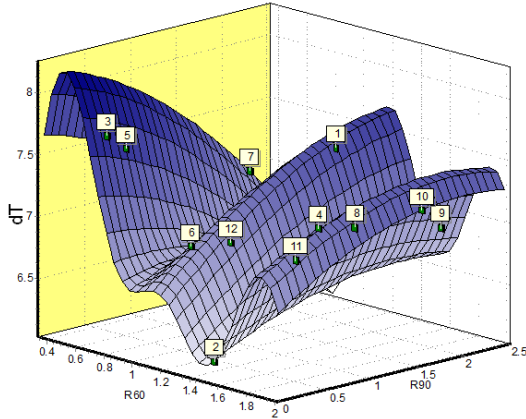
### 4.3. Atbilstošu kritēriju izvēle ventilācijas elementa optimizācijai

Šīs apakšnodaļas mērķis ir noteikt piemērotus kritērijus aizsargapģērba ventilācijas elementu formas optimizācijai, izmantojot metamodelēšanas pieeju. Sarežģītiem modeļiem parasti ir nepieciešami skaitļošanas ziņā sarežģīti algoritmi, tāpēc optimizācijas procesa paātrināšanai tiek izmantoti metamodeļi, ko dažkārt sauc par aproksimācijām, atbildes virsmām vai surogātmodeļiem. Pieeja ir tāda pati, kā aprakstīts 4.1. apakšnodaļā, bet šeit analīzei tiek izmantoti seši dažādi kritēriji.

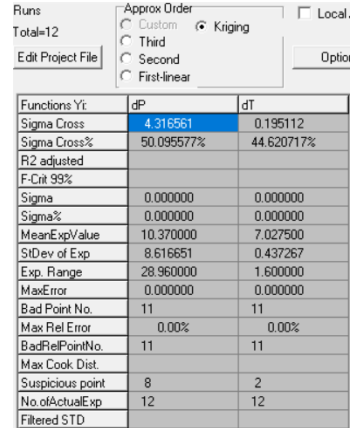
Plūsmas simulācijas pētījumā ņemti vērā šādi dažādi kritēriji:

- 1)  $HTR$  – siltuma apmaiņas intensitāte [W];
- 2)  $H$  – absolūtā kopējā entalpija (vidējā) [J/kg];
- 3)  $\Delta H$  – absolūtā kopējā entalpijas intensitāte [W];
- 4)  $HF$  – virsmas siltuma plūsma (vidējā) [W/m<sup>2</sup>];
- 5)  $dP$  – spiediena starpība (no plūsmas trajektorijām) [Pa];
- 6)  $dT$  – virsmas temperatūras starpība (ķermeņis) [°C].

## Rezultāti

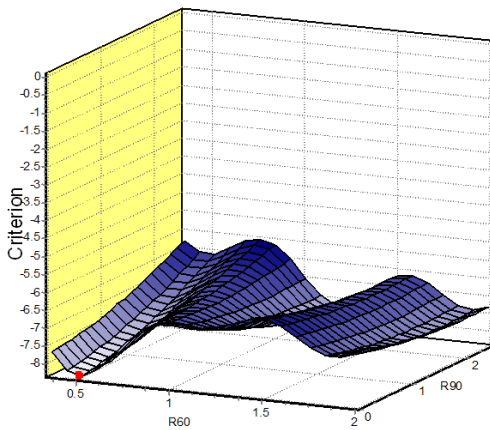


(a)



(b)

4.3.1. att. Atbildes virsma  $dT = f(R60, R90)$ , izmantojot 12 DOE Kriging aproksimācijai:  
(a) atbildes virsmas šķērsriezuma plakne; (b) aproksimācijas kvalitātes rādītāji.



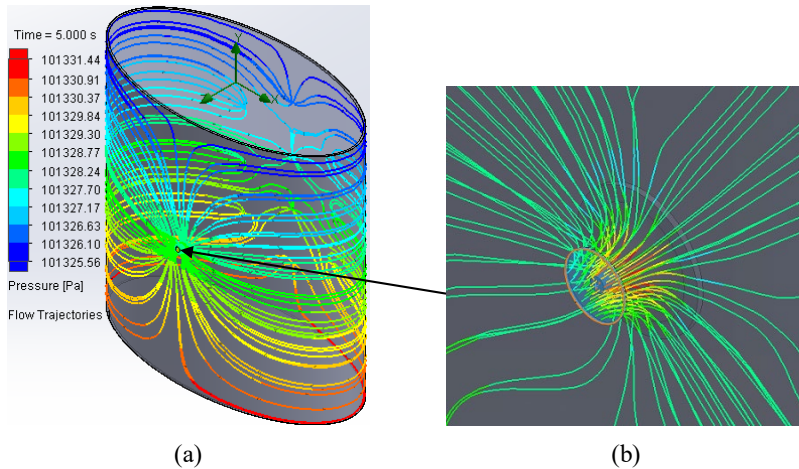
(a)

Set Range for X<sub>i</sub>, Y<sub>i</sub>, Fi and Click ColorBox to Visualize Active Constraint!

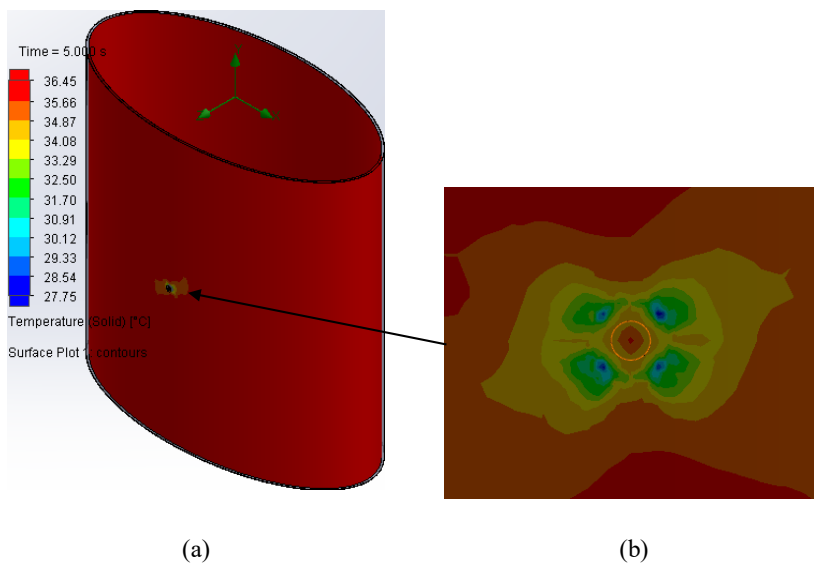
Indices No	Dopt	Min	Max
1) X1: R60	0.509738	0.36	2
2) X2: R90	0.01	0.01	2.5
3) Y1: dP	6.63321	0	0
4) Y2: dT	8.35219	0	0

(b)

4.3.2. att. Optimizācijas rezultāts (sarkanais punkts norāda  $-dT$  globālo minimumu): (a) kritērija virsmas šķērsriezuma plakne; (b) optimālās vērtības.

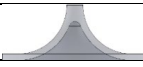
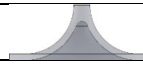


4.3.3. att. Spiediena sadalījums optimālajam elementa dizainam: (a) plūsmas spiediens visā modelī; (b) palielināts skats pie ventilācijas atveres.



4.3.4. att. Ķermeņa virsmas temperatūra: (a) visa modeļa virsmas temperatūras sadalījums; (b) palielināts skats pie ventilācijas atveres.

## Rezultātu apkopojums

Indeksi	dP [Pa]	dT [°C]
Elementa optimālā forma	R60 = 0,50;	R60 = 0,50;
	R90 = 0,01	R90 = 0,01
		
<i>Sigma Cross%</i>	50,09	44,62
Optimālās vērtības no <i>KEDRO</i>	6,63 (min)	8,35 (maksimālais)
Vērtība no plūsmas simulācijas rezultātiem	6,75	8,55

Vērtības, kas iegūtas optimālajam projektam, veicot optimizāciju, izmantojot *KEDRO* un *SolidWorks Flow Simulation*, ir tuvas ar nelielu novirzi 0,12 Pa dP gadījumā un 0,2 °C dT gadījumā. Procentuālā starpība starp iegūtajām vērtībām ir 1,7 % dP un 2,34 % dT. Kļūda iekļaujas pieļaujamās robežās, jo tā ir mazāka par 5 %.

#### 4.4. Ventilācijas elementa formas optimizācijas secinājumi

1. No 4.1. apakšnodaļā iegūtajiem rezultātiem var secināt, ka gredzena optimālajos projektēšanas punktos praktiski nav, kas liecina, ka vislabāko rezultātu nodrošinās elements bez ārējā gredzena. Pētījums parāda, ka metamodelēšanas pieejas izmantošana ar *CFD* simulāciju var ievērojami samazināt optimizācijai nepieciešamo skaitļošanas laiku.
2. 4.3. apakšnodaļā apskatīti dažādi ventilācijas elementa optimizācijas kritēriji, un rezultāti liecina, ka ne visas parametru vērtības uzrāda pietiekamu jutību elementa aproksimācijai un optimizācijai.
3. No rezultātiem ir skaidrs, ka dP un dT ir vispiemērotākie un jutīgākie kritēriji ventilācijas elementa optimizēšanai no visiem šajā pētījumā minētajiem kritērijiem. Turklāt šie abi parametri nodrošina vienādu optimālu ventilācijas elementa formu.
4. Tomēr dT uzrāda nedaudz labāku aproksimācijas kvalitāti nekā dP, kas padara dT par vispiemērotāko parametru ventilācijas elementa optimizācijai. Tas attiecas arī uz to, ka ventilācijas elementi ir jāizmanto aizsargtērpos, lai nodrošinātu efektīvu cilvēka ķermeņa dzesēšanu siltās vides vai lielas darba slodzes apstākļos, un temperatūra ir labākais rādītājs dzesēšanas efektivitātes prognozēšanai.

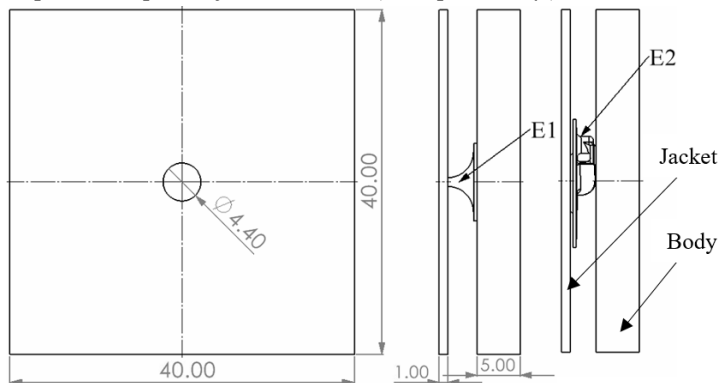
## 5. PĒTĪTĀ OBJEKTA (APĢĒRBA) UN VENTILĀCIJAS ELEMENTA EFEKTIVITĀTES ANALĪZE AR *SOLIDWORKS* PLŪSMAS SIMULĀCIJU

### 5.1. Ventilācijas elementa efektivitātes analīze ar vienkāršotu modeli

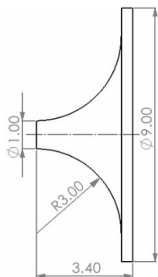
Šī pētījuma mērķis ir novērtēt ventilācijas elementu E1 un E2 efektivitāti, koncentrējoties uz aprēķina laika samazināšanu. Ventilācijas elementi ir paredzēti lietošanai aizsargtērpos, lai nodrošinātu efektīvu dzesēšanu un novērstu kukaiņu, lietus un putekļu tiešu nokļūšanu cilvēka ķermenī. Tāpēc ir ļoti svarīgi izvēlēties pareizo elementu. Smalka tīklojuma izmantošana simulācijā ir ļoti svarīga, lai iegūtu precīzus konstatējumus, taču tas ievērojami palielina skaitļošanas laiku. No otras puses, rupjš tīklojums var nenodrošināt precīzas vērtības, bet var būt noderīgs rezultātu salīdzināšanai, ja efektivitātes novērtēšanai izmanto vienus un tos pašus parametrus. Šajā pētījumā tiek salīdzināti ventilācijas elementi E1 un E2 divos atsevišķos scenārijos, lai noteiktu visefektīvāko elementu attiecībā uz optimālo skaitļošanas laiku. Pirmajā scenārijā tiek izmantots vienkāršots eliptisks cilvēka ķermeņa un jakas modelis. Otrajā gadījumā modelis ir vienkāršots divās kvadrātveida plāksnēs, kur viena plāksne attiecas uz jakas virsmu, otra – attēlo ķermeni. Šajā pētījumā tiek izmantota *SolidWorks* plūsmas simulācija, lai iegūtu rezultātus ar iepļūdes gaisa ātrumu 2 m/s. Konkrētie modeļa izmēri un robežnosacījumi ir izskaidroti nākamajā apakšnodaļā.

### 5.2. Vienkāršots modeļa dizains un robežnosacījumi

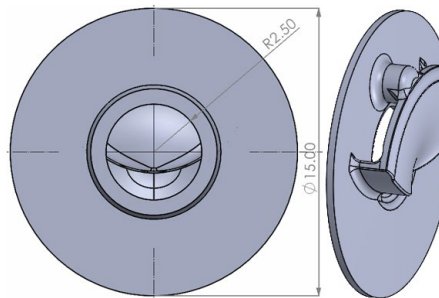
Šajā pētījumā salīdzināti ventilācijas elementi E1 un E2, lai noteiktu efektīvāko elementu, ņemot vērā optimālo aprēķina laiku. Modelis ir vienkāršots divās kvadrātveida plāksnēs, kur viena plāksne attiecas uz apvalka virsmu, otra – uz korpusu. Šajā pētījumā izmantota *SolidWorks* plūsmas simulācija, lai iegūtu rezultātus ar iepļūdes gaisa ātrumu 2 m/s. Robežnosacījumi un materiālu īpašības ir tādas pašas kā iepriekšējos uzdevumos (3.2. apakšnodaļa).



5.2.1. att. Vienkāršots modelis ar divām kvadrātveida plāksnēm.



5.2.2. att. Ventilācijas elements E1.



5.2.3. att. Ventilācijas elements E2.

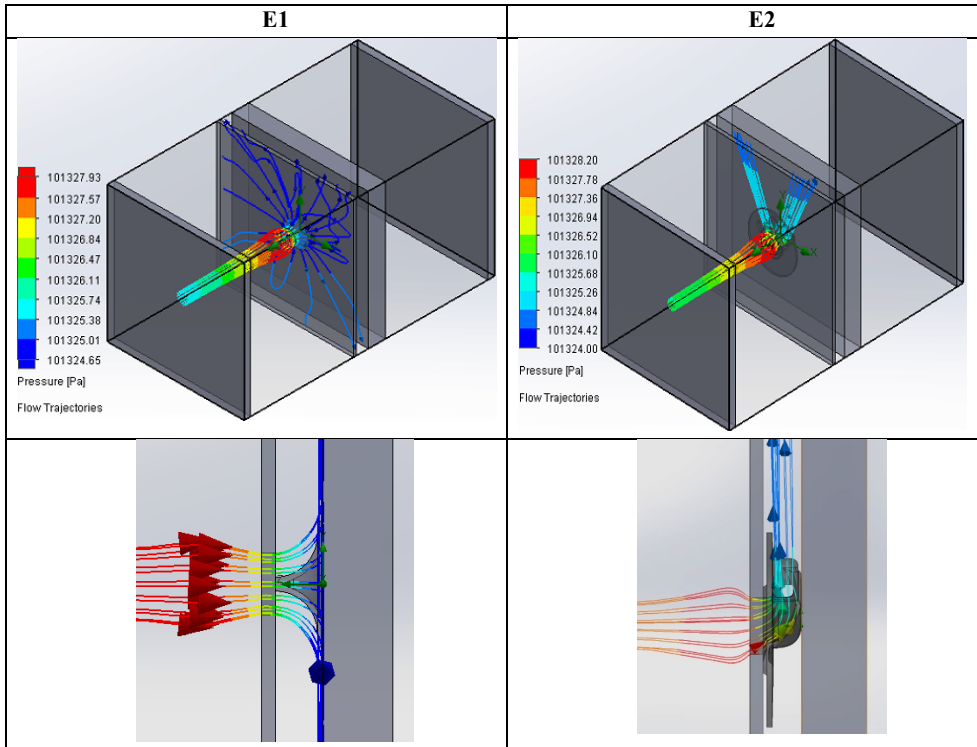
Turpmāk norādīti kritēriji, kas tika ņemti vērā, analizējot plūsmas simulācijas pētījumu:

- 1)  $HTR$  - siltuma apmaiņas intensitāte [W];
- 2)  $HF$  (vid.) – virsmas siltuma plūsma (vid.) [ $W/m^2$ ];
- 3)  $dP$  – spiediena starpība [Pa];
- 4)  $dT$  – virsmas temperatūras starpība (ķermeņis) [ $^{\circ}C$ ];
- 5)  $T$  (vid.) – vidējā virsmas temperatūra (ķermeņa) [ $^{\circ}C$ ].

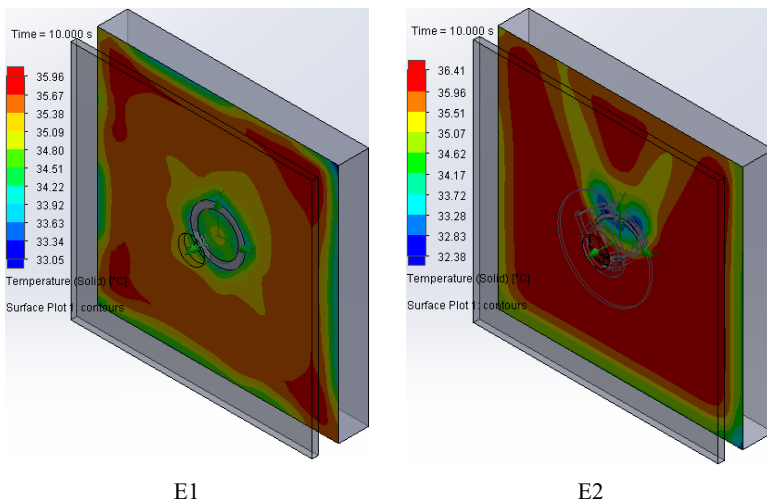
## Rezultāti

Visi minētie rezultāti ir modelēti 10 sekunžu laikam. Kritēriju  $dP$  un  $dT$  vērtības ir aprēķinātas, ņemot vērā 5.2.4. un 5.2.5. attēlā redzamos rezultātus, savukārt pārējo parametru vērtības ir iegūtas no virsmas parametru opcijas, kas pieejama *SolidWorks Flow Simulation* rezultātu apakšnodaļā. Visas iegūtās vērtības apkopotas 5.2. tabulā,  $\Delta$  attiecas uz vērtību starpību starp E1 un E2.





5.2.4. att. Spiediena sadalījums.



5.2.5. att. Virsmas temperatūras sadalījums otrajā gadījumā.

Rezultātu skaitliskās vērtības otrajam gadījumam

Parametri	E1	E2	$\Delta$
<i>HTR</i> [W]	0,328	0,196	0,132
<i>HF</i> (vid.) [ $W/m^2$ ]	207,097	124,507	82,59
dP [Pa]	3,28	4,2	0,92
dT [°C]	2,91	4,03	1,12
T (vid.) [°C]	35,34	35,90	0,56

5.2. tabulā redzams, ka HF un dT jutība ir lielāka nekā citiem kritērijiem. Elements E1 nodrošina augstāku HF vērtību, salīdzinot ar E2, kas liecina par to, ka E1 siltuma pārnese intensitāte ir labāka. Augstāka siltuma pārnese intensitāte nozīmē augstāku dzesēšanas efektivitāti, tāpēc E1 vidējā ķermeņa temperatūra (35,34 °C) ir zemāka nekā E2 (35,90 °C). Pamatojoties uz šiem diviem kritērijiem, var secināt, ka elements E1 nodrošina labāku dzesēšanas efektivitāti, salīdzinot ar E2.

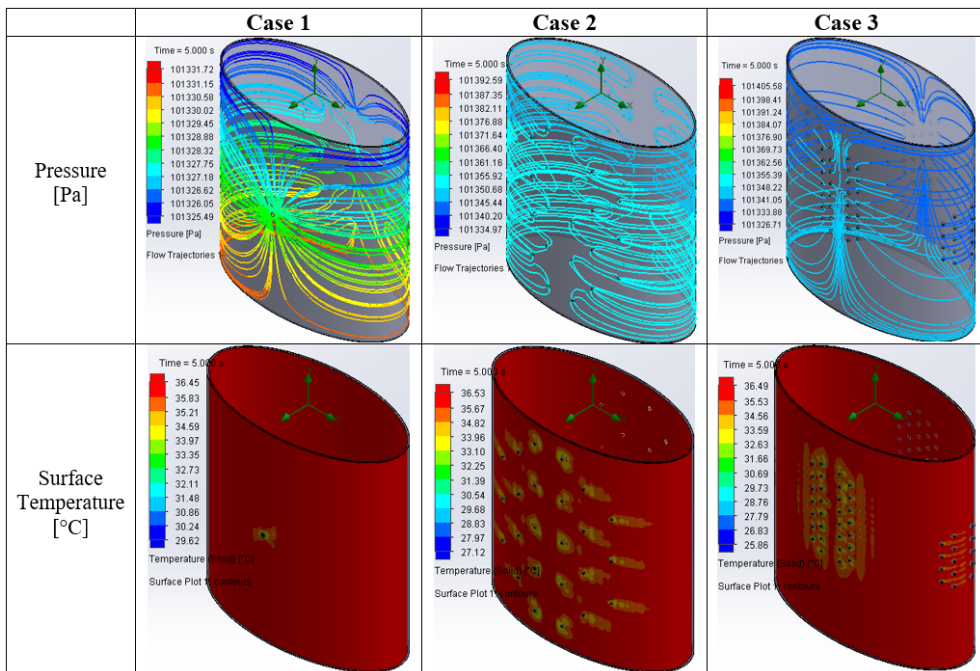
### 5.3. Atbilstošu kritēriju izvēle ventilējamo apgērbu efektivitātes analīzei

Šajā uzdevumā galvenā uzmanība pievērsta kritēriju izvēlei, lai veiktu plūsmas simulācijas analīzi un prognozētu ventilējama aizsargapgērba dzesēšanas efektivitāti. Šajā pētījumā aplūkoti trīs dažādi gadījumi, kad vienkāršotam eliptiskas formas cilvēka ķermeņa modelim ar aizsargtērpu, kas sastāv no 11, 48 un 105 ventilācijas elementiem.

Plūsmas simulācijas pētījumā analizētie kritēriji ir šādi:

- 1) *HTR* – siltuma apmaiņas intensitāte [W];
- 2)  $\Delta H$  – absolūtā kopējā entalpijas intensitāte [W];
- 3) *HF* (vid.) – virsmas siltuma plūsma (vid.) [ $W/m^2$ ];
- 4) dP – spiediena starpība [Pa];
- 5) dT – virsmas temperatūras starpība [°C];
- 6) T (vid.) – vidējā virsmas temperatūra [°C];
- 7) *PMV* (vid.) – prognozētais vidējais balsojums;
- 8) *PPD* (vid.) – prognozētais neapmierinātības procentuālais daudzums (vidējais) [%].

## Rezultāti



5.3. att. Spiediena un virsmas temperatūras sadalījums katrā no modeļiem.

5.3. tabula

Analizēto kritēriju skaitliskās vērtības

Kritēriji	1. gadījums	2. gadījums	3. gadījums
$HTR$ [W]	17,637	32,288	43,714
$\Delta H$ [W]	-1,021	-23,490	-43,140
$HF$ (vid.) [ $W/m^2$ ]	29,651	54,284	73,491
dP [Pa]	6,23	57,62	78,87
dT [°C]	6,83	9,41	10,63
T (vid.) [°C]	36,31	36,15	36,03
PMV (vid.)	3,05	2,95	2,93
PPD (vid.) [%]	99	98,8	98,5

Rezultātu analīze liecina, ka piemērotākie kritēriji siltuma izkļedes no sistēmas (ķermeņa) novērtēšanai šajā pētījumā ir  $HTR$  un  $HF$ . Ņemot vērā to, ka mērķis ir prognozēt dzesēšanas efektivitāti, jebkurš no kritērijiem var būt izdevīgs, jo dzesēšanas efektivitāte palielinās līdz ar siltuma pārnese ātruma pieaugumu.

#### 5.4. Secinājumi par atbilstošiem kritērijiem ventilējamā apgērbā efektivitātes analīzei

1. Pamatojoties uz rezultātu analīzi, var secināt, ka *HTR* un *HF* ir vispiemērotākie kritēriji, lai analizētu siltuma aizvadīšanu no sistēmas (ķermeņa) šajā uzdevumā. Ņemot vērā to, ka mērķis ir paredzēt dzesēšanas efektivitāti, jebkurš no kritērijiem var būt noderīgs, jo dzesēšanas efektivitāte palielinās, palielinoties siltuma pārnesei intensitātei.
2. Temperatūras starpība var būt šāds analīzes kritērijs, bet atsevišķos gadījumos tā var nenodrošināt pietiekamu jutību analīzēm, tāpēc šajā gadījumā to labāk izmantot kopā ar citiem atbilstošiem kritērijiem, piemēram, *HTR* vai *HF*, lai nodrošinātu rezultātu ticamību.
3. Šis pētījums parāda parametru vērtību variācijas *CFD* simulācijās dažādos gadījumos un identificē kritērijus, kas palīdz prognozēt dzesēšanas efektivitāti analīzē. Ir skaidrs, ka noteikti kritēriji, piemēram, spiediens, var nebūt īpaši noderīgi, lai prognozētu sistēmas dzesēšanas efektivitāti. Turklāt tādi parametri kā vidējā temperatūra noteiktos scenārijos var uzrādīt mazāku jutību.
4. Nākotnē tas ļauj formulēt reālākas un sarežģītākas *CFD* problēmas ventilējamam aizsargapģērbam, ņemot vērā nenoteiktību, ko rada, piemēram, mainot vēja virzienu un ventilācijas pozīciju.

## SECINĀJUMI

1. Šajā promocijas darbā sniegta plūsmas simulācijas pētījuma detalizēta analīze, izmantojot vienkāršotu cilvēka ķermeņa modeli. Skaitliskai simulācijai tiek izmantota *SolidWorks* plūsmas simulācija, kas sniedz izpratni par simulācijas pētījumiem un fluīdu plūsmas mijiedarbību.
2. Izveidoti un detalizēti analizēti dažādi vienkāršu un sarežģītu formu ventilācijas elementi, novietojot katru elementu pie attiecīgās ventilācijas atveres ventilācijas modelī. Veiktā skaitliskā analīze sniedz ieskatu par dažādu formu ventilācijas elementu ietekmi uz gaisa plūsmu un nosaka, ka toroidālās formas izgriezuma elements ir visefektīvākais, salīdzinot ar pārējiem pētījumā minētajiem.
3. Izstrādāta metodika, lai optimizētu toroidāli izgriezto ventilācijas elementu formu. Lai sasniegtu mērķi, tika izmantota metamodelēšanas metode, izmantojot dažādas kārtas polinomu lokālās un globālās aproksimācijas, kā arī Kriging aproksimācijas.
4. Iegūtās optimālās vērtības tika izmantotas, lai izstrādātu ventilācijas elementa optimālo formu, un tika veikta skaitliskā simulācija, izmantojot optimizēto ventilācijas elementu, lai salīdzinātu rezultātus ar optimizācijas rezultātiem. Iegūto rezultātu procentuālā atšķirība ir 2,34 %. Kļūda iekļaujas pieļaujamajā pielaidē, jo tā ir mazāka par 5 %.
5. Optimizācijas pētījums efektīvi parāda, ka metamodelēšanas pieejas apvienošana ar *CFD* simulāciju var ievērojami samazināt optimizācijai nepieciešamo skaitļošanas laiku. Lai veiktu *CFD* simulāciju viena kritērija punkta aprēķināšanai norādītajai problēmai, daudzkodolu datorā ar *i9* procesoru ir nepieciešamas vairāk nekā četras stundas apstrādes laika. Tomēr, izmantojot metamodeļus, visu optimizācijas procesu var pabeigt tikai dažu minūšu laikā.
6. Nākotnē tas ļauj izstrādāt precīzāku ventilācijas elementu formas optimizācijas problēmu, ņemot vērā daudzās ieplūdes atveru pozīcijas un nenoteiktību, ko rada tādi faktori kā mainīgs vēja virziens. Tāpat šī metode ir noderīga citu līdzīgu optimizācijas problēmu risināšanā.
7. Analizēti dažādi kritēriji, lai paredzētu vispiemērotāko no tiem ventilācijas elementa formas optimizācijai un ventilējamā apgērba dzesēšanas efektivitātes prognozēšanai skaitliskās simulācijas laikā. Rezultāti liecina, ka plūsmas spiediens (dP) un temperatūras starpība (dT) ir visjutīgākie kritēriji ventilācijas elementu optimizācijai, savukārt siltuma apmaiņas intensitāte (*HTR*) ir vispiemērotākais dzesēšanas efektivitātes prognozēšanai. Tas ļauj izvēlēties pareizos kritērijus turpmākajiem pētījumiem.

## ATSAUCES

- [1] Chai, J., Kang, Z., Yan, Y., Lou, L., Zhou, Y., Fan J. Thermoregulatory clothing with temperature-adaptive multimodal body heat regulation. *Science Direct*. Volume 3, Issue 7, 20 July 2022, 100958.
- [2] U.S. Department of Labor. Overview: Working in Outdoor and Indoor Heat Environments. Occupational Safety and Health Administration. <https://www.osha.gov/heat-exposure>
- [3] De Sousa, J., Cheatham, C., Wittbrodt M. The effect of a moisture-wicking fabric shirt on the physiological and perceptual responses during acute exercise in the heat. November 2014, *Applied Ergonomics* 45(6):1447–1453.
- [4] Russ Clarke-Wildeman R. Wicking fabric. Olorun-sports.com. Published online on August 15, 2018.
- [5] Zhao, M., Gao, C., Wang, F., Kuklane, K., Holmér, I., Li J. A study on local cooling of garments with ventilation fans and openings placed at different torso sites. *International Journal of Industrial Ergonomics*. Volume 43, Issue 3, May 2013, 232–237.
- [6] Zhang, M., Li, Z., Wang, Q., Xu, Y., Hu, P., Zhang, X. Performance investigation of a portable liquid cooling garment using thermoelectric cooling. *Applied Thermal Engineering*. Volume 214, September 2022, 118830.
- [7] Yazdi, M. M., Sheikhzadeh, M. Personal cooling garments: a review. *The Journal of the Textile Institute*. Volume 105, 2014, Issue 12, 1231–1250.
- [8] Guo, T., Shang, B., Duan, B., Luo, X. Design and testing of a liquid cooled garment for hot environments. *Journal of Thermal Biology*. Volumes 49–50, April–May 2015, 47–54.
- [9] Revaiah, R. G., Kotresh, T. M., Kandasubramanian, B. Technical textiles for military applications. *The Journal of the Textile Institute*. Volume 111, 2020, Issue 2, 273–308.
- [10] Al Sayed, C., Vinches, L., Hallé, S. Towards optimizing a personal cooling garment for hot and humid deep mining conditions. *Open Journal of Optimization*. Vol. 05, No. 01, March 2016, 35–43.
- [11] Cvetanović, S.G., Rutić, S.Z., Krstić, D.D., Florus, S., Otrisal, P. The influence of an active microclimate liquid-cooled vest on heat strain alleviation. *Thermal Science* 2021, Volume 25, Issue 5 Part B, 3837–3846.
- [12] Teunissen, L.P.J., Wang, L.-C., Chou, S.-N., Huang, C.-h., Jou, G.-T., Daanen, H.A.M. Evaluation of two cooling systems under a firefighter coverall. *Applied Ergonomics*. Volume 45, Issue 6, November 2014, 1433–1438.
- [13] Ren, S., Han, M., Fang, J. Personal Cooling Garments: A Review. *MDPI Journal of Polymers*, 2022 Dec; 14(24): 5522. doi: [10.3390/polym14245522](https://doi.org/10.3390/polym14245522)
- [14] Bartkowiak, G., Dabrowska, A., Marszalek, A. Assessment of an active liquid cooling garment intended for use in a hot environment. *Applied Ergonomics*. Volume 58, January 2017, 182–189.
- [15] Ni, X., Yao, T., Zhang, Y., Zhao, Y., Hu, Q., Chan, A.P. Experimental study on the efficacy of a novel personal cooling vest incorporated with phase change materials and fans. *MDPI Journal of Materials* 2020, 13(8), 1801; <https://doi.org/10.3390/ma13081801>
- [16] Erkan, G. Enhancing the thermal properties of textiles with phase change materials. *Research Journal of Textile and Apparel*, May 2004, Volume 8, Issue 2, 57–64.

- [17] Lou, L., Wu, Y.S., Zhou, Y., Fan, J. Effects of body positions and garment design on the performance of a personal air cooling/heating system. *International Journal of Indoor Environment and Health*, January 2022, Volume 32, Issue 1.
- [18] Lou, L., Shou, D., Park, H., Zhao, D., Wu, Y.S., Hui, X., Yang, R., Kan, E.C., Fan, J. Thermoelectric air conditioning undergarment for personal thermal management and HVAC energy saving. *Energy and Buildings*. Volume 226, 1 November 2020, 110374.
- [19] Yang, B., Ding, X., Wang, F., Li, A. A review of intensified conditioning of personal micro-environments: Moving closer to the human body. *Energy and Built Environment*. Volume 2, Issue 3, July 2021, 260–270.
- [20] Zhang, T., Li K., Zhang J., Chen M., Wang, Z., Ma S., Zhang N., Wei L. High-performance, flexible, and ultralong crystalline thermoelectric fibers. *Nano Energy*. Volume 41, November 2017, 35–42.
- [21] Hong, S., Gu, Y., Seo, J.K., Wang, J., Liu, P., Meng, Y.S., Xu, S., Chen, R.K. Wearable thermoelectrics for personalized thermoregulation. *Science Advances*. Volume 5, Issue 5, 17 May 2019.
- [22] Zhang, Y., Gao, J., Zhu, S., Li, J., Lai, H., Peng, Y., Miao, L. Wearable Thermoelectric Cooler Based on a Two-Layer Hydrogel/Nickel Foam Heatsink with Two-Axis Flexibility. *ACS Applied Materials & Interfaces*. Volume 14, Issue 13, March 2022.
- [23] Singha, K., Maity, S., Pandit, P., Md. Ibrahim, H. Mondal, chapter 1 – Introduction to protective textiles. *Protective Textiles from Natural Resources*. The Textile Institute Book Series, 2022, 3–38.
- [24] Silva, C., Landim, P., Santos, J. An introduction about the usability of protective clothing: a historical analysis. *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*, Volume 5, July 2014.
- [25] Gibson, P., Schreuder-Gibson, H., Rivin, D. Transport properties of porous membranes based on electrospun nanofibers, *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 187–188 (2001) 469–481.
- [26] LaTourrette, T., Peterson, D. J., Bartis, J., Jackson, B., Houser, A. Protecting emergency responders, Volume 2: community views of safety and health risks and personal protection needs.
- [27] Eric VAN WELY. Current global standards for chemical protective clothing: how to choose the right protection for the right job? *Industrial Health*. Volume 55(6), 2017.
- [28] Hick, J., Hanfling, D., Burstein, J., Markham, J., Macintyre, A., Barbera, J. Protective equipment for health care facility decontamination personnel: Regulations, risks, and recommendations. *Annals of Emergency Medicine*. Volume 42, Issue 3, September 2003, 370–380.
- [29] Bhattacharjee, S., Joshi, R., Chughtai, A., Macintyre, C. Graphene Modified Multifunctional Personal Protective Clothing. *Advanced Materials Interfaces*. Volume 6(21), August 2019.
- [30] Novoselov, K., Fal'ko, V., Colombo, L., Gellert, P., Schwab, M., Kim, K. A roadmap for graphene. *Nature*, volume 490, 192–200, (2012).
- [31] He, H., Gao, C. General Approach to Individually Dispersed, Highly Soluble, and Conductive Graphene Nanosheets Functionalized by Nitrene Chemistry. *Chem. Mater.* 2010, Volume 22(17), 5054–5064.

- [32] Kumar, R., Aggarwal, R.K., Sharma, J.D., Pathania, S. Predicting Energy Requirement for Cooling the Building Using Artificial Neural Network. *Journal of Technology Innovations in Renewable Energy*, 2012, 1, 113–121.
- [33] Giering, K., Lamprecht, I., Minet, O. Specific heat capacities of human and animal tissues. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, January 1996, 2624:188–197.
- [34] Rugh, J., Bharathan, D. Predicting Human Thermal Comfort in Automobiles. Presented at the Vehicle Thermal Management Systems Conference and Exhibition, May 2005, Toronto, Canada.





**Sanjay Rajni Vejanand** Vejanand dzimis 1991. gadā Vadālā, Porbandaras apgabalā (Gudžarātā, Indijā). Gudžarātas Tehnoloģiskajā universitātē (Ahmedabadā) ieguvis bakalaura grādu mašīnbūvē (2015), Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) – maģistra grādu inženierzinātnēs (mehānikā un mašīnbūvē; 2019). No 2015. gada septembra līdz 2017. gada jūnijam strādājis par mehānikas projektēšanas inženieri uzņēmumā "*The CAD World*" (Rajkotā, Indijā). No 2019. gada decembra līdz 2020. gada februārim bijis inženiera mehāniķa praktikants "*Morfomichaniki*" (Frenaros, Kiprā). Kopš 2020. gada ir RTU zinātniskais asistents. Zinātniskās intereses saistītas ar tādām tēmām kā *CFD*, *CAD*, šķidruma mehānika, galīgo elementu modelēšana, galīgo elementu analīze, metamodelēšana un optimizācija.