

# Analiza sustava hlađenja za niskotemperaturni svežanj PEM gorivnih članaka

---

**Peternel, Tin**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:126022>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-10-19**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Tin Peternel**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**ZAVRŠNI RAD**

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Ankica Kovač, MSc. AE.

Student:

Tin Peternel

Zagreb, 2022.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorici izv. prof. dr. sc. Ankici Kovač i asistentu Dinku Brezaku na svim savjetima, literaturi, vremenu i velikom strpljenju koje su uložili kako bi mi pomogli. Bez njihovih znanja, korisnih smjernica i dobre volje u savjetovanju, izrada ovog završnog rada ne bi bila moguća. Zahvaljujem se svim profesorima i učiteljima koji su me na ovaj ili onaj način naučili nečemu za vrijeme moga školovanja.

Također, zahvaljujem se majci Valentini i ocu Zoranu, te braći i prijateljima na svojoj pomoći i podršci koju su mi pružili tijekom studija.

Tin Peternel



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

## ZAVRŠNI ZADATAK

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 - 04 / 22 - 6 / 1	
Ur. broj: 15 - 1703 - 22 -	

Student: **Tin Peternel**

Mat. br.: 0035206841

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza sustava hlađenja za niskotemperaturni svežanj PEM gorivnih članaka**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Cooling system analysis for low temperature PEM fuel cell stack**

Opis zadatka:

PEM gorivni članak pogodan je za mobilne i stacionarne primjene zbog optimalne radne temperature, brzog pokretanja te brzog odziva na promjene u uvjetima različitih opterećenja. Pri tome važnu ulogu igra sustav hlađenja s obzirom na to da nejednakost temperature uzrokuje promjenljivu brzinu elektrokemijske reakcije na pojedinim mjestima što smanjuje stabilnost i trajnost PEM gorivnih članaka. Iz tog razloga, u ovom radu istražiti će se postojeći tipovi sustava hlađenja za niskotemperaturni svežanj PEM gorivnih članaka.

U radu je potrebno:

1. Provesti analizu usporedbe niskotemperaturnog i visokotemperaturnog svežnja PEM gorivnih članaka.
2. Istražiti sustave hlađenja niskotemperaturnog svežnja PEM gorivnih članaka.
3. Na temelju istraženoga, odabrati optimalni sustav hlađenja niskotemperaturnog svežnja PEM gorivnih članaka temeljem simulacije modela izrađenoga u MATLAB / Simunik paketu.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Datum predaje rada:

- 1. rok:** 24. 2. 2022.  
**2. rok (izvanredni):** 6. 7. 2022.  
**3. rok:** 22. 9. 2022.

Predviđeni datumi obrane:

- 1. rok:** 28.2. - 4.3.2022.  
**2. rok (izvanredni):** 8.7.2022.  
**3. rok:** 26.9. - 30.9.2022.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

doc. dr. sc. Ankica Kovač, MEng. AE.

prof. dr. sc. Vladimir Soldo

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS OZNAKA .....	III
KRATICE.....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY .....	VI
1. UVOD.....	1
1.1. Što je PEM i kako radi gorivni članak .....	1
1.2. Moguće primjene gorivnih članaka.....	2
2. Usporedba niskotemperaturnog i visokotemperaturnog svežnja PEM gorivnih članaka ....	3
2.1. Razlika između niskotemperaturnog i visokotemperaturnog svežnja PEM gorivnih članaka .....	3
2.2. Parametri koje treba regulirati u gorivnim člancima .....	3
2.3. Prednosti visokotemperaturnog svežnja gorivnih članaka.....	4
3. Sustavi hlađenja niskotemperaturnog svežnja PEM gorivnih članaka .....	7
3.1. Analiza sustava za hlađenje niskotemperaturnog svežnja PEM gorivnih članaka .....	7
3.1.1. Zračno hlađenje.....	9
3.1.2. Hlađenje tekućinom .....	11
3.2. Odabir optimalnog sustava za hlađenje niskotemperaturnog svežnja PEM gorivnih članaka srednje snage.....	16
3.2.1. Model u MATLAB / Simulinku .....	19
3.2.1.1. Model u MATLAB / Simulinku za trokutni poprečni presjek.....	19
3.2.2. Analiza dobivenih rezultata .....	23
Zaključak.....	31
LITERATURA.....	32

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Princip rada gorivnoga članka.....	1
Slika 2. Afinitet platine prema CO [6] .....	5
Slika 3. Vodljivost Nafion i PBI membrane [3].....	5
Slika 4. Raspodjela energije u gorivnome članku [8] .....	7
Slika 5. Utjecaj temperature na snagu gorivnoga članka [12].....	8
Slika 6. Sustav za zračno hlađenje [7].....	10
Slika 7. Prikaz nejednolikosti zračnog hlađenja [7] .....	11
Slika 8. Shema hlađenja tekućinom [8].....	12
Slika 9. Sheme kanala za rashladnu tekućinu [9].....	13
Slika 10. Hlađenje tekućinom kroz zmijoliko-paralelnu petlju kanala [8] .....	13
Slika 11. Oblik kanala za rashladnu tekućinu [8].....	14
Slika 12. Oblik kanala za rashladnu tekućinu na bipolarnoj ploči .....	16
Slika 13. Dimenzije bipolarne ploče .....	17
Slika 14. Simulink model za trokutni presjek .....	19
Slika 15. Simulink model za $Re$ za trokutni presjek .....	20
Slika 16. Simulink model za $Nu$ za trokutni presjek pri laminarnome strujanju .....	21
Slika 17. Simulink model za alfu za trokutni presjek pri laminarnome strujanju .....	21
Slika 18. Simulink model za $Nu$ za trokutni presjek pri turbulentnome strujanju .....	22
Slika 19. Simulink model za alfu za trokutni presjek pri turbulentnome strujanju.....	23
Slika 20. Graf ovisnosti $Re$ o brzini strujanja kroz cijev .....	24
Slika 21. Granična brzina strujanja kroz cijev pri laminarnome strujanju .....	25
Slika 22. Odvedeni toplinski tok pri razlici temperatura rashladne tvari od 2 °C .....	26
Slika 23. Mogući odvedeni toplinski tok pri graničnim brzinama .....	27
Slika 24. Toplinski tok pri graničnoj brzini strujanja za turbulentno područje.....	28

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$A$	$[m^2]$	Površina poprečnog presjeka
$c$	$[J/kgK]$	Specifični toplinski kapacitet
$d$	$[mm]$	Promjer
$Dekv$	$[m]$	Ekvivalentni promjer
$h_{iz}$	$[J/kg]$	Izlazna entalpija
$h_{ul}$	$[J/kg]$	Ulazna entalpija
$I$	$[A]$	Jakost struje
$L$	$[mm]$	Duljina
$Nu$	/	Nusseltov broj
$O$	$[m]$	Opseg poprečnoga presjeka
$P$	$[W]$	Snaga
$Q$	$[W]$	Toplina
$q_m$	$[kg/s]$	Maseni protok
$Re$	/	Reynoldsov broj
$T$	$[^{\circ}C]$	Temperatura
$U$	$[V]$	Napon
$w$	$[m/s]$	Brzina strujanja tekućine
$w_{gr}$	$[m/s]$	Granična brzina strujanja tekućine
$\alpha$	$[W/m^2 K]$	Koeficijent konvektivnog prijelaza topline
$\eta$	$[\%]$	Učinkovitost
$\lambda$	$[W/mK]$	Toplinska vodljivost
$\mu$	$[Pas]$	Dinamička viskoznost
$\nu$	$[m^2/s]$	Kinematička viskoznost
$\rho$	$[kg/m^3]$	Gustoća
$\Phi$	$[W]$	Toplinski tok



**KRATICE**

PEM	Protonski propusna membrana (eng. Proton Exchange Membrane)
LT-PEMFC	Niskotemperaturni gorivni članak s protonski propusnom membranom (eng. Low-Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell)
HT-PEMFC	Visokotemperaturni gorivni članak s protonski propusnom membranom (eng. High-Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell)
Nafion	Membrana na bazi perflorosulfonske kiseline
PBI	Membrana na bazi polimenzimidazolne fosforne kiseline
Pe	Pecletova značajka
Pr	Prandtlova značajka

## SAŽETAK

Temelj ovog završnog rada je svežanj vodikovih gorivnih članaka s protonski propusnom membranom. Uspoređeni su visokotemperaturni i niskotemperaturni svežnjevi vodikovih gorivnih članaka. Objasnjeno je koje su prednosti visokotemperaturnoga u usporedbi s niskotemperaturnim svežnjem vodikovih gorivnih članaka te su pobrojani neki od problema zbog kojih visokotemperaturni svežnjevi još nisu u komercijalnoj uporabi. Nadalje, prikazana je analiza sustava za hlađenje zrakom i rashladnom tekućinom. Raspravljeno je koji od sustava hlađenja bolje funkcionira i u kojim uvjetima. Za svaki od sustava hlađenja razrađene su inačice koje su provedive i koje se koriste u praksi. Na temelju iznesenih činjenica odabran je optimalan sustav za hlađenje niskotemperaturnoga svežnja vodikovih gorivnih članaka. Napravljena je analiza u MATLAB / Simulink programskom paketu te su diskutirani dobiveni rezultati koji zorno prikazuju koliko je za sustav hlađenja bitna geometrija kanala za rashladnu tekućinu i brzina strujanja rashladne tekućine kroz kanal.

**Ključne riječi:** protonski propusna membrana (PEM), visokotemperaturni svežanj vodikovih gorivnih članaka, niskotemperaturni svežanj vodikovih gorivnih članaka, zračno hlađenje, hlađenje rashladnom tekućinom.

## SUMMARY

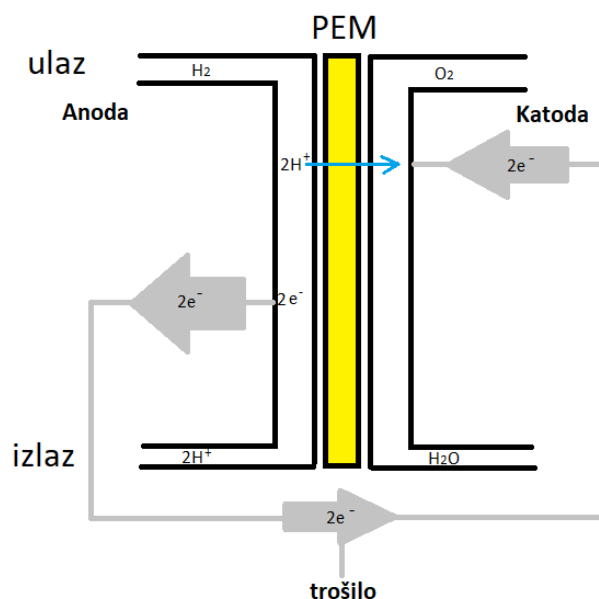
This thesis is based hydrogen fuel cell stacks with proton-exchange membrane. High-temperature and low-temperature hydrogen fuel cell stacks are compared, followed by a detailed explanation of the advantages of high-temperature stacks in comparison to low-temperature hydrogen fuel cell stacks. Along with that, several issues that prevent high-temperature stacks from being in commercial use are examined. Furthermore, air-coolant systems and coolant-solution systems are analyzed, with the emphasis on an explanation of which system operates best under which conditions. For each of the cooling systems, feasible instances that can be used in practice are shown. Lastly, based on the conducted analysis, the optimal system for the low-temperature hydrogen fuel cell stacks cooling process is chosen. The MATLAB / Simulink programme package analysis has been made and results clearly show how important the canal geometry is for the cooling liquid, along with the speed of the cooling liquid through the very canal.

**Keywords:** proton exchange membrane (PEM), high-temperature fuel cells, low-temperature fuel cells, air-cooling, liquid cooling.

## 1. UVOD

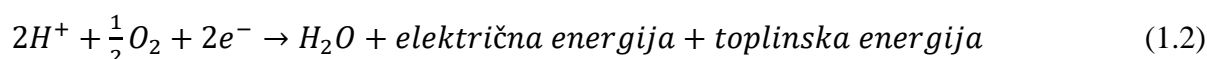
### 1.1. Što je PEM i kako radi gorivni članak

PEM (eng. Proton Exchange Membrane) je membrana u gorivnim člancima koja propušta samo protone. S jedne strane membrane dovodi se vodik, a s druge strane zrak iz kojeg je za reakciju potreban kisik. Strana s koje se dovodi vodik je anoda, a strana s koje se dovodi kisik, odnosno zrak, je katoda. Vodik se ionizira i kao produkti pojavljuju se slobodni elektroni i pozitivno nabijeni ioni vodika, takozvani vodikovi kationi. Zatim, kationi vodika prolaze kroz PEM, a elektroni se odvođe vodičem do kisika koji se ionizira. Potom dolazi do elektrokemijske reakcije kationa vodika, elektrona i kisika te nastaje voda uz osjetno oslobađanje topline. Sa stajališta stabilnosti i intenziteta reakcije, poželjno bi bilo imati što višu radnu temperaturu, ali to ograničava materijal membrane. Prilikom prolaska elektrona kroz vodič s anode na katodu dobiva se usmjereno strujanje elektrona, odnosno struja koja se može koristiti za razne funkcije trošila [3].



**Slika 1.** Princip rada gorivnoga članka

Jednadžbe koje opisuju elektrokemijsku reakciju u gorivnome članku su [1]:



Za funkcioniranje gorivnoga članka važna su dva faktora: temperatura i vlažnost membrane. S obzirom na radnu temperaturu, gorivni članci dijele se na niskotemperaturne i visokotemperaturne. Niskotemperaturni su oni koji rade na temperaturama do 100 °C - najčešće u intervalu od 60 °C do 80 °C, a visokotemperaturni iznad 100 °C - najčešće u intervalu od 120 °C do 200 °C.

Faktor koji diktira dopuštenu radnu temperaturu gorivnoga članka je upravo PEM. Za niskotemperaturne gorivne članke najčešće se za PEM koristi perflorosulfonska kiselina (Nafion) [1]. Takva membrana ima hidrofobnu i hidrofilnu fazu. Hidrofobna faza održava konstantnost konstrukcije dok hidrofilna faza pohranjuje vodu koja je nužna za funkcioniranje membrane jer je ona nositelj naboja, odnosno vodič kroz membranu. Stoga je bitno da je membrana optimalno vlažna. Ako je membrana dehidrirana doći će do slabljenja propusnosti membrane i usporavanja reakcije, a ako je prevlažna doći će do poplave i plinovi neće moći strujati [3]. Zato je za dobro funkcioniranje gorivnoga članka važna dobra regulacija temperature i dobave vode kako ne bi došlo do dehidracije ili plavljenja membrane.

## 1.2. Moguće primjene gorivnih članaka

Primjena gorivnih članaka je široka, gotovo neograničena. Pogodni su za mobilnu (vozila) i stacionarnu primjenu. Kako se u zadnjim godinama čovječanstvo sve više okreće obnovljivim izvorima energije (OIE) i energentima koji manje zagađuju okoliš, vodikovi gorivni članci su se odlično uklopili u taj koncept i popunili prazninu koja je i najkompleksnija za tranziciju, a to je transport koji čini oko 30% ukupne potrošnje energenata. Gorivni članci imaju veću učinkovitost od motora s unutarnjim izgaranjem. Uzrok tome je što su manji gubitci pri pretvorbi kemijske energije u električnu, a potom pomoću elektromotora u mehaničku energiju, u odnosu na gubitke pretvorbe kemijske energije u toplinsku te njena pretvorba u mehaničku koja je potrebna za pokretanje automobila [3]. Primjer primjene vodikovih gorivnih članaka u automobilskoj industriji su Toyota sa svojim modelom Mirai, zatim Honda, Hyundai, Mercedes, itd..

## **2. Usporedba niskotemperaturnoga i visokotemperaturnoga svežnja PEM gorivnih članaka**

### **2.1. Razlika između niskotemperaturnoga i visokotemperaturnoga svežnja PEM gorivnih članaka**

Glavna razlika između niskotemperaturnoga i visokotemperaturnoga svežnja gorivnih članaka je temperatura na kojoj se odvija elektrokemijska reakcija vodika i kisika (kojega se najčešće dovodi iz zraka). Dozvoljena temperatura u sustavu ovisi o materijalu PEM-a. U niskotemperaturnim svežnjevima gorivnih članaka PEM je izrađena iz materijala kojemu je osnova perflorosulfonska kiselina - u industriji poznatija kao Nafion. Ovakva membrana dobro funkcionira na nižim temperaturama u intervalu od 60 °C do 80 °C [3].

U zadnje vrijeme radilo se na pronalasku nešto temperaturno izdržljivije PEM. Kao dobro rješenje se pokazala PBI membrana na bazi polimenzimidazolne fosforne kiseline koja je otpornija na više temperature [3]. Takva se membrana koristi kod visokotemperaturnoga svežnja gorivnih članaka koji onda mogu funkcionirati i na višim temperaturama, najčešće u intervalu od 120 °C do 200 °C [3]. Kako se pri tim temperaturama voda pojavljuje u obliku pare, voda više nije vodič kroz PEM već tu zadaću obavlja fosforna kiselina.

### **2.2. Parametri koje treba regulirati u gorivnim člancima**

#### **Dobava vodika i kisika:**

Protok reaktanata, odnosno vodika i kisika (zraka), potrebno je regulirati kako bi se zadovoljio stehiometrijski omjer te kako bi sav vodik sudjelovao u elektrokemijskoj reakciji. Ako bi se dovodilo previše reaktanata, rasla bi temperatura kod niskotemperaturnog svežnja gorivnih članaka te bi došlo do dehidracije membrane koja bi time izgubila na svojoj vodljivosti. Kod visokotemperaturnog svežnja gorivnih članaka došlo bi do znatnog trošenja i ubrzanog propadanja sustava. Ako bi se protok reaktanata pak previše smanjio, došlo bi do „gladovanja“ što uzrokuje usporavanje reakcije s mogućnošću i potpunoga prekida reakcije [3].

**Grijanje sustava:**

Regulacija topline je sljedeći parametar koji se mora kontrolirati. Pri pokretanju sustava potrebno je osigurati dovoljnu količinu topline pa se postavlja poseban sustav za grijanje vodikovih gorivnih članaka. To je posebno naglašeno kod visokotemperaturnih gorivnih članaka jer se kod njih ne smije pojaviti tekuća voda pa je sustav potrebno zagrijati na 120 °C [3].

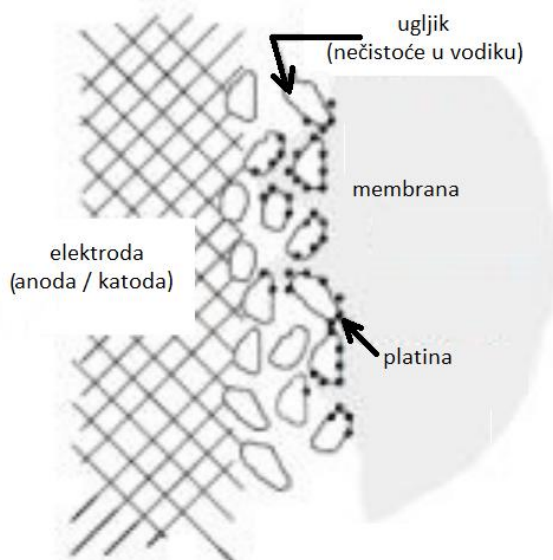
**Hlađenje sustava:**

Sljedeći problem koji se mora riješiti vezan je za odvođenje topline iz sustava kako ne bi dolazilo do pregrijavanja sustava. Niskotemperaturni svežanj gorivnih članaka potrebno je hladiti kako temperatura ne bi premašila 80 °C i tako uzrokovala dehidraciju membrane. Sustav hlađenja za niskotemperaturni svežanj gorivnih članaka dodatno je opisan u nastavku rada.

Kod visokotemperaturnoga svežnja gorivnih članaka, sustav hlađenja potrebno je osmisliti tako da temperatura ne premašuje 180 °C kako ne bi došlo do značajnijega i užurbanijega propadanja sustava [3].

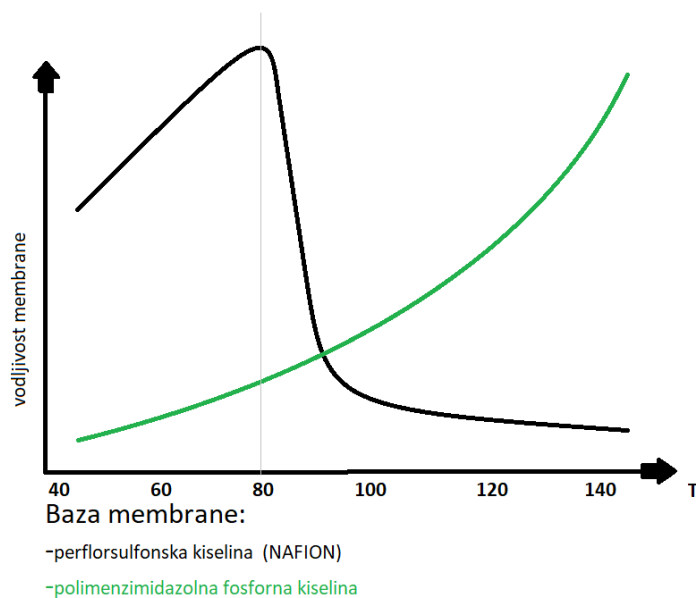
**2.3. Prednosti visokotemperaturnoga svežnja gorivnih članaka**

S porastom temperature raste stabilnost i intenzitet reakcije. Tako se sa svežnjevima gorivnih članaka koji rade na višim temperaturama dobivaju učinkovitiji uređaji. Teorijski, učinkovitost svežnja gorivnih članaka je 83%. Mogući uzroci manje učinkovitosti od teorijske su ti što se ne troši sva energija (nastala elektrokemijskom reakcijom vodika i kisika) na dobivanje struje, već je znatan gubitak u stvaranju topline koja je nusprodukt reakcije. Glavna prednost visokotemperaturnog svežnja gorivnih članaka je u tome što je manje osjetljiv na čistoću vodika koji je potreban za odvijanje reakcije [3].



**Slika 2.** Afinitet platine prema CO [6]

Unutar konstrukcije gorivnoga članka, kao katalizator se koristi platina koja ima afinitet prema ugljikovom monoksidu (CO). Do stvaranja CO dolazi zbog reakcije ugljika koji se pojavljuje kao nečistoća u vodiku i kisika, a potom se događaju apsorpcije CO na površini katalizatora [4]. Pokazalo se da otpor strujanju protona kroz membranu opada s povećanjem temperature [5].



**Slika 3.** Vodljivost Nafion i PBI membrane [3]



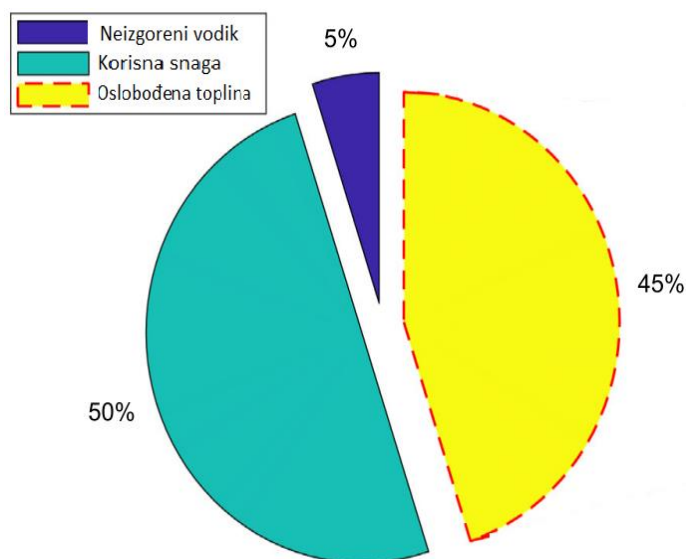
Kako ne bi došlo do značajnoga propadanja, gornja temperatura se ograničava na 180 °C, dok je najniža temperatura ograničena uvjetom da se u svežnju ne pojavljuje tekuća voda, dakle 120 °C, koja bi poplavila membranu i time smanjila propusnost membrane. Optimalna temperatura rada visokotemperaturnoga svežnja gorivnih članaka je oko 140 °C [6]. S obzirom na to da je sustav stabilniji, učinkovitiji pa i otporniji na onečišćenja vodika na višim temperaturama, omogućen je rad sustava s vodikom nešto slabije čistoće.

Kod visokotemperaturnoga svežnja gorivnih članaka veća je razlika između okoliša i radne temperature na kojoj se odvija reakcija te je takav sustav lakše hladiti okolišnim zrakom. Kako sustav radi na višim temperaturama, otvara se i mogućnost iskorištavanja otpadne topline za neku sekundarnu svrhu. Dakako, uz činjenicu da je visokotemperaturni svežanj gorivnih članaka učinkovitiji od niskotemperaturnoga, manji su gubitci, te da je potrebna nešto slabija čistoća vodika nego što je to morala biti kod niskotemperaturnoga svežnja gorivnih članaka, doći će do znatnih ušteda troškova pri proizvodnji i potrošnji vodika za funkcioniranje visokotemperaturnoga svežnja gorivnih članaka [3].

### 3. Sustavi hlađenja niskotemperaturnoga svežnja PEM gorivnih članaka

#### 3.1. Analiza sustava za hlađenje niskotemperaturnoga svežnja PEM gorivnih članaka

Za pravilan, siguran i dugotrajan rad svežnja vodikovih gorivnih članaka, uz ostale zahtjeve koji se moraju regulirati, nužan je i sustav hlađenja koji odvodi toplinu koja nastaje pri elektrokemijskoj reakciji vodika i kisika.



Slika 4. Raspodjela energije u gorivnome članku [8]

Za sustav se može postaviti prvi glavni stavak termodinamike [14]:

$$\sum q_{m,i} \cdot H_{ul,i} = \sum q_{m,i} \cdot H_{iz,i} + P + Q \quad (3.1)$$

gdje su:

Q – toplina oslobođena u elektrokemijskoj reakciji vodika i kisika u gorivnome članku;

P – dobivena električna snaga iz gorivnoga članka;

$\sum H_{ul}$  – suma entalpija vodika i kisika koji se dovode u sustav;

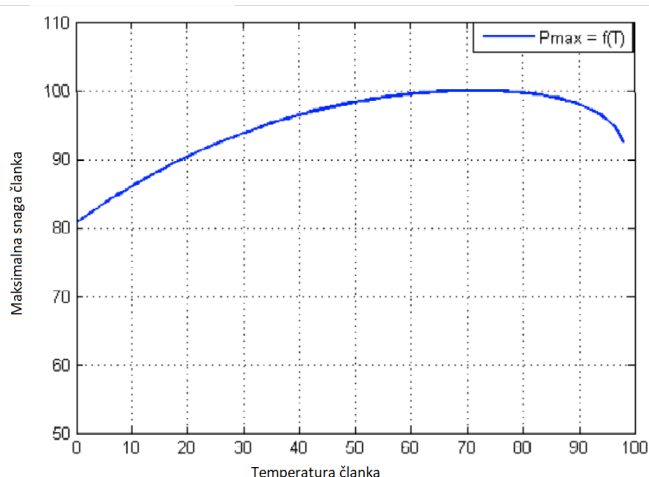
$\Sigma H_{iz}$  – izlazna entalpija nastalih produkata pri elektrokemijskoj reakciji vodika i kisika (dominantno je to voda, ali zbog nepotpunog izgaranja moguće je da se pojavi 'neizgoreni' vodik i drugi produkti koji nastaju ako vodik nije visoke čistoće);

$q_{m,i}$  – maseni protok reaktanata i produkata.

Kako je vidljivo iz slike 4., pri elektrokemijskoj reakciji vodika i kisika korisna snaga iznosi 50% ukupne energije i to je ono što se želi dobiti iz svežnja gorivnih članaka. Ostatak energije se sastoji od manjeg dijela koji otpada na vodik koji nije sudjelovao u reakciji, otprilike 5%, te dominantni dio koji se manifestira oslobađanjem topline i iznosi nekih 45% od ukupne energije.

Vodik koji nije sudjelovao u elektrokemijskoj reakciji i oslobođena toplina predstavljaju direktne gubitke. Toplina oslobođena elektrokemijskom reakcijom se dijelom koristi za održavanje optimalne temperature. Međutim, pojavljuje se problem prevelikoga rasta temperature pa je za pravilan rad sustava potrebno višak topline, koji nije potreban za održavanje optimalnoga rada sustava, u području optimalne temperature odvesti iz sustava, a to se vrši sustavom za hlađenje [8].

Dobar sustav hlađenja važan je kako bi spriječilo pregrijavanje cijeloga sustava te da ne bi došlo do dehidracije membrane što bi uzrokovalo značajan pad vodljivosti Nafion membrane. Ako temperatura poraste iznad projektirane temperature, dogodit će se pad snage sustava jer je sustav projektiran na točno određenu temperaturu koja je optimalna za rad sustava.



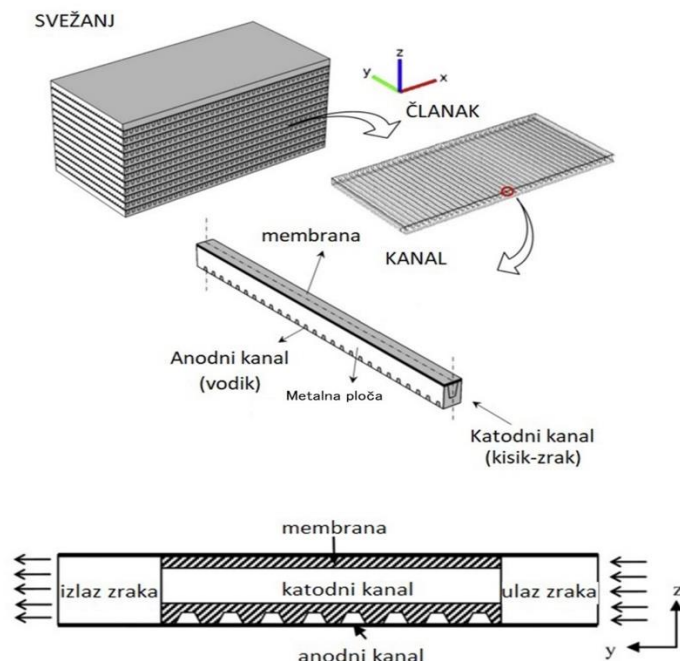
**Slika 5.** Utjecaj temperature na snagu gorivnoga članka [12]

Kako je vidljivo iz slike 5, za niskotemperaturni svežanj vodikovih gorivnih članaka, temperaturu je potrebno održavati u granicama od 60 °C do 80 °C. Sustavu znatno opada snaga ako radi u pregrijanom području iznad 80 °C. Prema tome, uloga sustava za hlađenje je da održava zadanu temperaturu te da osigura što ravnomjerniju raspodjelu temperature po članku. Zadanu temperaturu se može održavati hlađenjem ili grijanjem. Grijanje je važno na početku odvijanja procesa kako bi sustav došao do radne temperature, a nakon toga dominantno je hlađenje sustava.

Kako bi se odredio najprikladniji sustav za hlađenje niskotemperaturnoga svežnja gorivnih članaka, u nastavku rada provedena je analiza sustava za hlađenje koje je moguće implementirati u sustav. U praksi se koriste dvije inačice sustava hlađenja – zračno hlađenje [7] i vodeno hlađenje [8].

### **3.1.1. Zračno hlađenje**

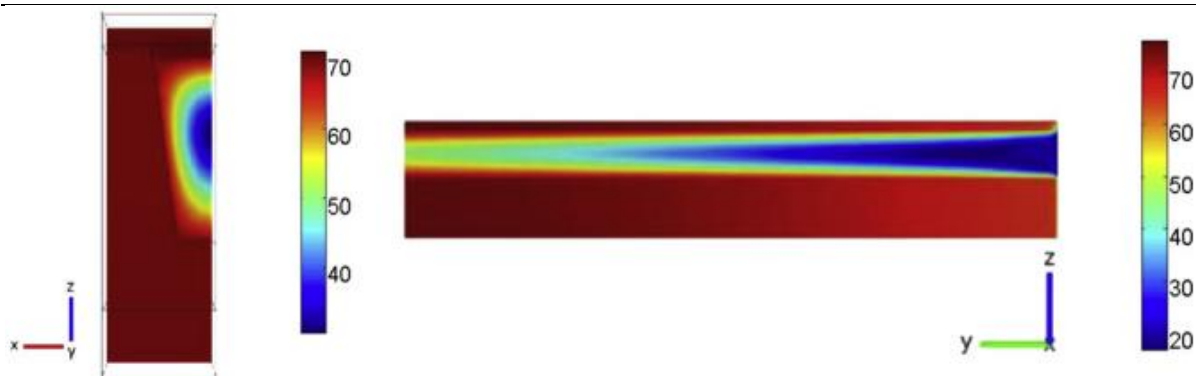
Zračno hlađenje je oblik hlađenja u kojemu je medij koji vrši hlađenje okolišni zrak. Kod hlađenja zrakom dominantan je prijenos topline prisilnom konvekcijom s članaka na okolišni zrak. Konvekcija u zračnom hlađenju mora biti prisilna kako bi se sustav hladio dovoljnim intenzitetom pa je za takav sustav hlađenja potreban ventilator. Kako je objašnjeno u radu [7], hlađenje zrakom se vrši tako da se u sustav namjerno dovodi više zraka od onog koji je potreban za samu kemijsku reakciju između vodika i kisika. Za sustave malih snaga nije potrebno posebno dovoditi zrak u sustav već se on hladi preko svojih stijenki koje graniče s okolišem [7].



**Slika 6.** Sustav za zračno hlađenje [7]

Na metalnim pločama se nalaze anodni i katodni kanali te se one nazivaju bipolarnim pločama, a najčešće su izrađene od titana. Anodnim kanalom se dovodi vodik, a katodnim kanalom kisik, odnosno zrak potreban za elektrokemijsku reakciju. Kako je prikazano na slici 6., svežanj se sastoji od više članaka spojenih u seriju. Jedan članak se sastoji od membrane i dvije elektrode. Dvije bipolarne ploče okrenute su tako da na jednoj membrana liježe na anodnu, a na drugoj bipolarnoj ploči na katodnu stranu. U isto vrijeme obje bipolarne ploče svojom suprotnom stranom čine komponentu dva susjedna članka. U radu je već naglašeno da je za zračno hlađenje potrebno dovoditi okolišni zrak u sustav. To će se napraviti tako što će se povećati protok zraka u katodnom kanalu iako taj višak zraka nije potreban za reakciju.

Ovaj oblik zračnog hlađenja s dovodom viška zraka u katodni kanal pogodan je za hlađenje sustava do 100 W. Za sustave sa snagom višom od 200 W koriste se sustavi za zračno hlađenje s odvojenim kanalima za zrak. Zračno hlađenje je upotrebljivo za sustave kojima snaga ne premašuje 2 kW [8]. Za visokotemperaturni svežanj gorivnih članaka zračno hlađenje je optimalan sustav hlađenja jer je temperatura sustava puno viša od temperature okolišnog zraka pa je i njihova razlika puno veća. Sukladno tome, zračno hlađenje kod visokotemperaturnoga svežnja gorivnih članaka malih snaga daje dovoljan intenzitet hlađenja.



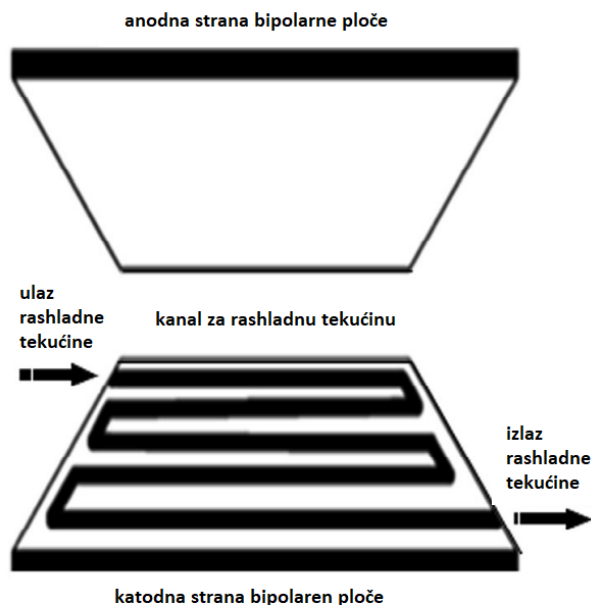
**Slika 7.** Prikaz nejednolikosti zračnog hlađenja [7]

Za niskotemperaturne svežnjeve gorivnih članaka problem predstavlja baš ta mala razlika između temperature sustava i temperature okolišnog zraka pa je hlađenje slabijeg intenziteta. Problem zraka je i što se brzo zagrije pa se javlja problem neujednačene temperature po svežnju gorivnih članaka. Početni članci u svežnju se hlade intenzivnije od onih pri kraju te tako nastaje toplinska neravnoteža u svežnju, a što je prikazano slikom 7 [7].

Vidljivo je da na ulazu zrak ima temperaturu 25 °C, a što je temperatura okolišnoga zraka. Do polovice duljine kanala za zračno hlađenje zrak je već na nekih 40 °C dok je na izlazu oko visokih 55 °C. Do tako značajnog porasta temperature od ulaza zraka u rashladni kanal do izlaza dolazi zbog niskog toplinskog kapaciteta zraka. Jasno je da je zbog većeg gradijenta temperature zraka i stijenke kanala na ulazu u odnosu na izlazu potencijal hlađenja veći približavanjem ulazu zraka. Ukoliko sustav treba intenzivnije hladiti, kod zračnog hlađenja preostaje samo povećati protok zraka povećanjem brzine protoka zraka. Kako bi se izbjegla nejednolikost pri hlađenju, razvili su se modeli koji hlade medijima koji imaju bolje značajke bitne za hlađenje npr. vodeno hlađenje, hlađenje rashladnom tekućinom [8].

### 3.1.2. Hlađenje tekućinom

Najrasprostranjeniji predstavnik tekućina za hlađenje je voda pa se takvo hlađenje naziva vodeno hlađenje. Konstrukcija sustava vodenoga hlađenja složenijeg je dizajna od konstrukcije zračnoga hlađenja, ali znatno boljih značajki pa je i primjerenije za hlađenje sustava niskotemperaturnih gorivnih članaka većih snaga.



**Slika 8.** Shema hlađenja tekućinom [8]

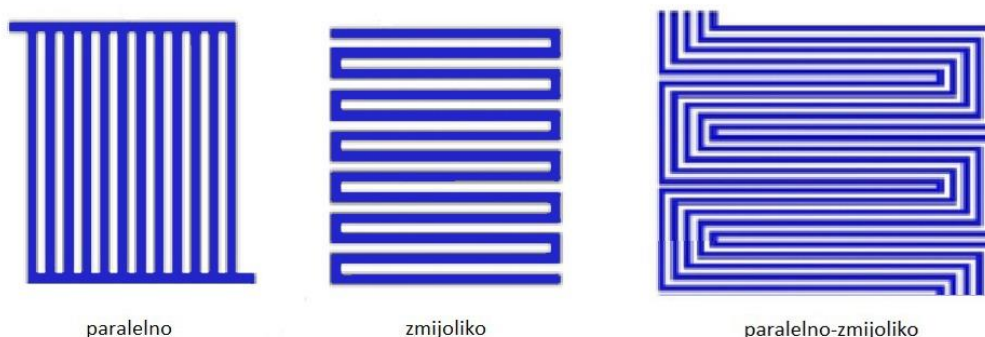
Na slici 8. prikazan je sustav koji se koristi za hlađenje tekućinom. Bitna komponenta za ovaj oblik hlađenja je bipolarna ploča u kojoj se nalaze kanali za rashladnu tekućinu. S jednog kraja ulazi rashladna tekućina koja struji kanalima za rashladnu tekućinu te na sebe preuzima toplinu koju odvodi iz sustava. Kanali za rashladnu tekućinu moraju biti što bolje konstruirani kako bi rashladna tekućina preuzela na sebe potrebni toplinski tok [8].

Voda je od zraka bolji medij za hlađenje jer ima viši toplinski kapacitet i bolje provodi toplinu. Vodeno hlađenje se koristi u velikoj većini komercijalnih svežnjeva gorivnih članaka koji su za sada mahom niskotemperaturni, a kojima je razlika između temperature sustava i temperature okolišnog zraka premala da bi se sustav učinkovito hladio [8]. Također, zračno hlađenje je prigodno za hlađenje sustava manjih snaga do 2 kW, a za veće snage primjenjuje se vodeno hlađenje.

S obzirom da se u uvijek teži boljem i učinkovitijem, znanstvenici su došli na ideju da vodu zamjene tekućinom na bazi nanočestica [8]. Kako bi poboljšali vodeno hlađenje, znanstvenici su se posvetili poboljšanju značajki vode bitnih za hlađenje dodavši joj neke druge tekućine poput glikola, etanola, antifrizi i drugih, zatim boljoj konstrukciji geometrije kanala za rashladnu tekućinu te preciznijem i detaljnijem izračunu protoka tekućine.

Kanali za rashladnu tekućinu moraju biti konstruirani tako da imaju što manji pad tlaka pri strujanju rashladne tekućine. Također, bitno je da je raspored kanala dobro konstruiran kako bi odvodnja topline bila što ravnomjernija unutar svežnja gorivnih članaka.

Kanali se raspoređuju u više shema: paralelna petlja, zmijolika petlja ili paralelno-zmijolika petlja kako je prikazano na slici 9 [8].

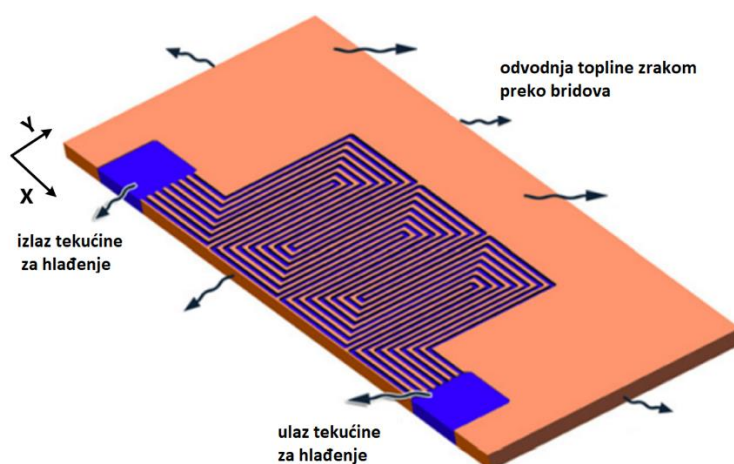


**Slika 9.** Sheme kanala za rashladnu tekućinu [9]

Kako su istraživanja pokazala, za paralelnu shemu kanala za rashladnu tekućinu razmak između dva kanala ne smije biti veći od 2 mm. Paralelan raspored kanala povoljan je za hlađenje svežnja gorivnih članaka nešto manjih snaga <math><10\text{kW}</math>.

Zmijolika raspodjela kanala za rashladnu tekućinu se pokazala kao bolja varijanta od paralelne jer pruža ravnomjerniju odvodnju topline u svežnju gorivnih članaka iako je kod nje pad tlaka nešto veći nego kod paralelnog rasporeda kanala. Također, dizajn konstrukcije je nešto kompliciranije za izvesti pa je zmijolika petlja nešto skuplja u izradi od paralelne.

Kao najbolje rješenje se pokazala paralelno-zmijolika raspodjela kanala jer se na taj način postiže najravnomjernija odvodnja topline iz sustava [9].

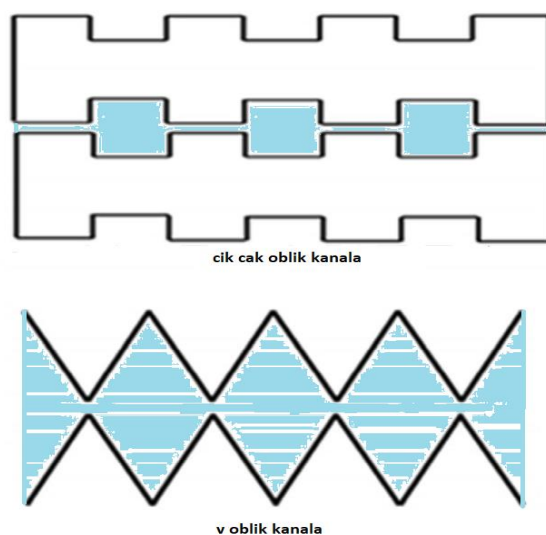


**Slika 10.** Hlađenje tekućinom kroz zmijoliko-paralelnu petlju kanala [8]



Kod paralelno-zmijolike izvedbe kanala za rashladnu tekućinu na jednom kraju bipolarne ploče ulazi rashladna tekućina i razvodi se po bipolarnoj ploči po više međusobno paralelnih kanala koji se na drugom kraju bipolarne ploče ponovo spajaju (slika 10). Kanali moraju biti konstruirani tako da su svi identične duljine kako bi rashladna tekućina na sebe preuzimala jednak toplinski tok bez obzira kojim se kanalom razvodi po ploči [9].

Kroz različita ispitivanja došlo se do zaključka da je sustav hlađenja bolji ako je protok fluida većeg Reynoldsovog broja ( $Re$ ). Kako bi se postiglo što nemirnije strujanje tekućine za hlađenje kroz kanale, dosjetili su se da kanale ne naprave glatkima, nego da ih razgranaju po različitim oblicima. Kao najučinkovitiji su se pokazali cik-cak i V oblik kanala koji su shematski prikazani na slici 11 [8].



**Slika 11.** Oblik kanala za rashladnu tekućinu [8]

Kroz različite eksperimente, mjerenjima se pokazalo da cik-cak oblik kanala najbolje odvodi toplinu, ali i da su padovi tlaka u protoku, mjereni na ulazu i na izlazu tekućine za hlađenje u gorivni članak, znatni i kao takvi zabrinjavajući. Do pada tlaka dolazi zbog otpora strujanju fluida za takav oblik kanala pa je na izlazu tlak značajno niži nego što bi bio da fluid struji kroz profil koji ima zaobljenije stijenke i čiji otpor bi bio manji. Kao optimalno rješenje se nametnuo V oblik kanala koji također dobro odvodi toplinu iz sustava, a padovi tlaka su osjetno manji [8].

Nadalje, išlo se za optimizacijom kanala i došlo se na ideju eksperimentiranja s visinom kanala. Istraživanja su vršena na visinama kanala od 0,5, 1, 1,6 i 3,2 mm.

Iz mjerenja se pokazalo da značajke hlađenja rastu s visinom kanala sve do visine 3,2 mm kada zbog značajnog nakupljanja vode u sustavu odvodnja topline značajno opada [9].

Kada su se ispitala sva poboljšanja u obliku kanala za razvod tekućine za hlađenje, istraživanja su bila usmjerena na sastav tekućine za hlađenje. Idealna rashladna tekućina trebala bi imati sljedeće značajke [8]:

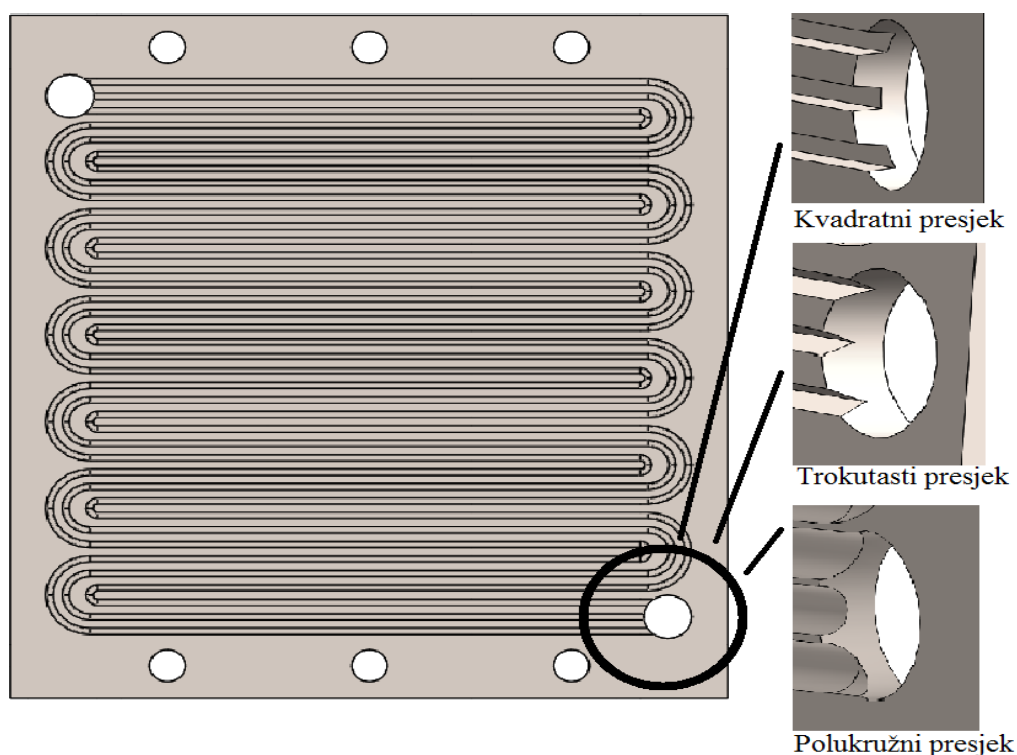
- što viši toplinski kapacitet.
- što bolju vodljivost.
- da je kemijski inertna.
- da ima što nižu viskoznost.
- da ne uzrokuje koroziju.
- da nije toksična.
- da nije vodič elektriciteta.
- da je što jeftinija.

Kao rješenje, vodi su se dodali različiti aditivi, antikoroziivi i antifriz. Antifriz je dodan kako bi se spriječilo zamrzavanje vode u kanalima za rashladnu tekućinu kada svežanj gorivnih članaka ne radi jer bi zamrzavanjem vode u tim kanalima došlo do oštećenja konstrukcije. Vremenom se rashladna tekućina onečisti te joj opadaju značajke bitne za što bolje hlađenje. Eksperimentima se pokazalo da snaga gorivnog članka direktno ovisi o električnoj vodljivosti rashladne tekućine i to tako da s povećanjem električne vodljivosti rashladne tekućine snaga gorivnoga članka pada. U pronalasku što kvalitetnije rashladne tekućine, pokazalo se da kerozin pokazuje odlične značajke pa se kao optimalno rješenje dobila vodena emulzija u kerozinu [10]. Kao krajnje rješenje, došlo se do nanofluida koji se sastoji od deionizirane vode i različitih aditiva (azoli, aromatski hidroksidi i amini) [11].

Nakon što se rashladnom tekućinom odvede toplina iz svežnja vodikovih gorivnih članaka, potrebno je tu toplinu nekako odvesti u okoliš. To se postiže tako da se rashladna tekućina odvodi do hladnjaka u kojemu se nju hladi okolišnim zrakom .

### 3.2. Odabir optimalnog sustava za hlađenje niskotemperaturnoga svežnja PEM gorivnih članaka srednje snage

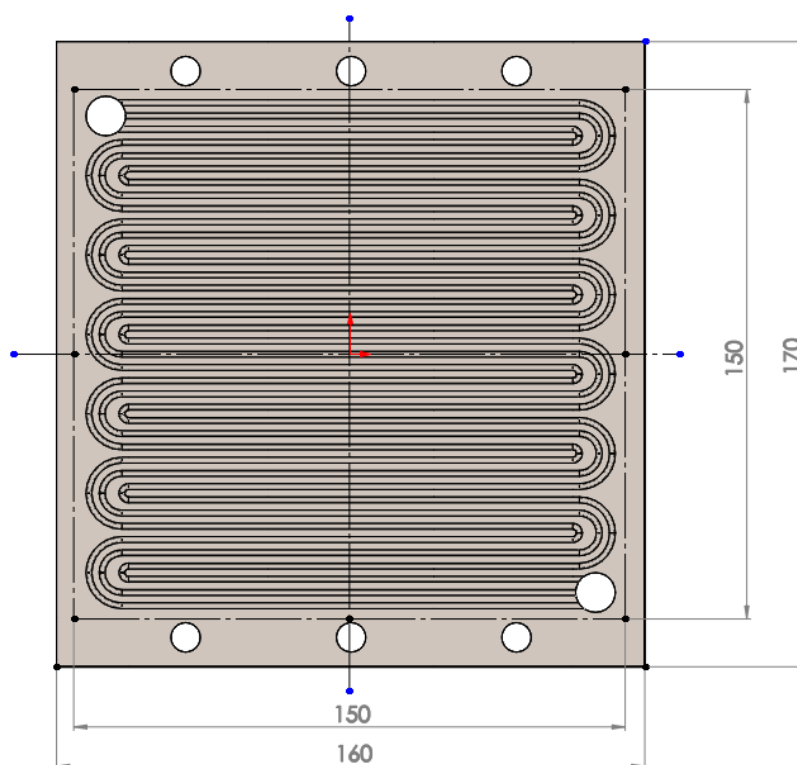
Može se uvesti pretpostavka da je sustav koji treba hladiti srednje snage. Uza sve prednosti i nedostatke odabran je sustav hlađenja s rashladnom tekućinom za niskotemperaturni svežanj PEM gorivnih članaka. Glavni razlog zašto je odabran sustav hlađenja rashladnom tekućinom je taj što zrak nema dovoljan intenzitet hlađenja sustava. Razlog za slabije značajke zračnog hlađenja leži u nizu čimbenika. Jedan od njih je mala razlika između radne temperature sustava od 60 °C do 80 °C i okolišnog zraka 25 °C. Nadalje, zrak je puno lošijih značajki bitnih za odvodnju topline od rashladne tekućine jer je puno manjeg toplinskog kapaciteta i slabije toplinske vodljivosti. Još jedan od razloga zašto je odabran sustav hlađenja s rashladnom tekućinom je taj što je kod njega ujednačenija odvodnja topline po gorivnome članku. Za rashladnu tekućinu je odabrana smjesa etilena (31,6%) i glikola (64,4%) navedenih množinskih koncentracija koji se već koristi u praksi [8]. U svrhu pronalaženja optimalnog sustava hlađenja u ovom radu osmišljen je oblik kanala na bipolarnoj ploči koji su prikazani na slikama 12 i 13.



**Slika 12.** Oblik kanala za rashladnu tekućinu na bipolarnoj ploči

Kod odabira petlje rashladnih kanala odabrana je paralelno-zmijolika izvedba s tri paralelna kanala. Kanalima se mijenja poprečni presjek, vrši analiza dobivenih parametara, te određuje koji je povoljniji za hlađenje odabranog sustava. U ovom radu napravljena je analiza za trokutni, kvadratni i polukružni poprečni presjek kanala za rashladnu tekućinu. Sva pravila i formule koje vrijede za ova tri slučaja vrijedit će za bilo koji oblik poprečnog presjeka kanala, samo će se mijenjati geometrija poprečnoga presjeka, a time i svi parametri koji su bitni za daljnju analizu traženja optimalnog sustava hlađenja.

Visina kanala za rashladnu tekućinu je 1,6 mm jer manje visine imaju lošije značajke, a veće znatno povećavaju količinu rashladne tekućine koja je potrebna za sustav hlađenja te se više rashladne tekućine nalazi u samom gorivnome članku pa se on slabije hladi. Bipolarna ploča je debljine 3 mm, širine 160 mm i visine 170 mm. Radna površina bipolarne ploče je 150 x 150 mm i na njoj se nalaze kanali za hlađenje sustava.



**Slika 13.** Dimenzije bipolarne ploče

Visinu kanala držat će se konstantnom kod sva tri primjera poprečnih presjeka kanala pa je tako visina trokutnog kanala  $v_{tr} = 1,6$  mm, stranica kvadratnog kanala  $a = 1,6$  mm i polumjer polukružnog kanala  $r = 1,6$  mm.

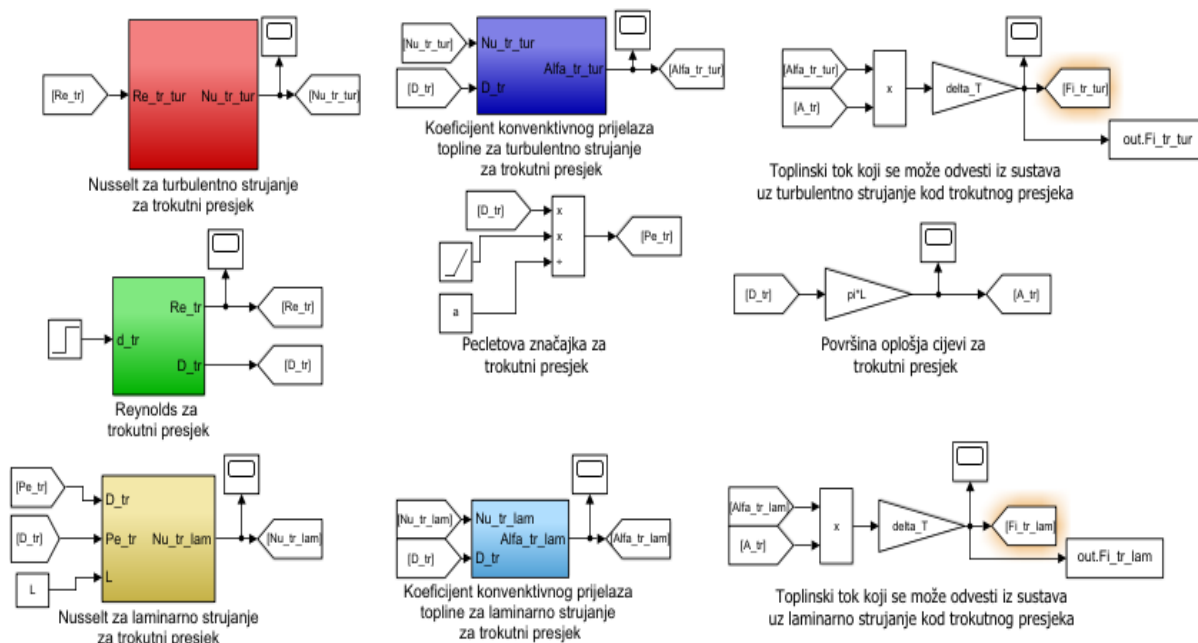
Odabrani niskotemperaturni svežanj sastoji se od 60 članaka, a ukupna snaga ( $P$ ) je 4 kW. Toplinski gubitci ovakvih sustava su otprilike 50%. Dakle, toplinski tok  $\Phi$  oslobođen pri radu ovoga sustava iznosi pola snage  $P$ .

Pretpostavka je da je sav oslobođeni toplinski tok potrebno odvesti iz sustava putem rashladnog sustava. Dakako, ovdje se uvodi znatno pojednostavljenje jer se dobar dio iz sustava odvodi kroz bočne stijenke i završne ploče te pri konvekciji zbog strujanja pri dobavi reaktanata; vodika, kisika (zraka), i odvodnji produkata (vode). Ovo pojednostavljenje se uvodi kako bi se olakšali proračun hlađenja sustava, a može ga se uvesti jer je s njime pretpostavljeno da iz sustava treba odvesti više toplinskoga toka nego što će u praksi biti potrebno.

Radna temperatura Nafion membrane je 60 °C, a proračunom se dobiva da je temperatura stijenki kanala za hlađenje 47 °C, dakle rashladno sredstvo mora biti na nižim temperaturama od temperature stijenke kako bi se sustav hladio. Na ulazu je rashladno sredstvo temperature 30 °C, a temperatura na izlazu ovisi o parametrima koji se mijenjaju zbog same geometrije rashladnih kanala. Grubim proračunom dobiva se ukupni toplinski tok koji je potrebno odvesti iz sustava  $\Phi = 2$  kW. Kada ga se podijeli s brojem članaka  $N = 60$  dobiva se toplinski tok koji se mora odvesti iz sustava pojedinom bipolarnom pločom i on iznosi  $\Phi = 33,3W$ . Daljnji proračun provodit će se po modelu prisilne konvekcije kroz cijev.

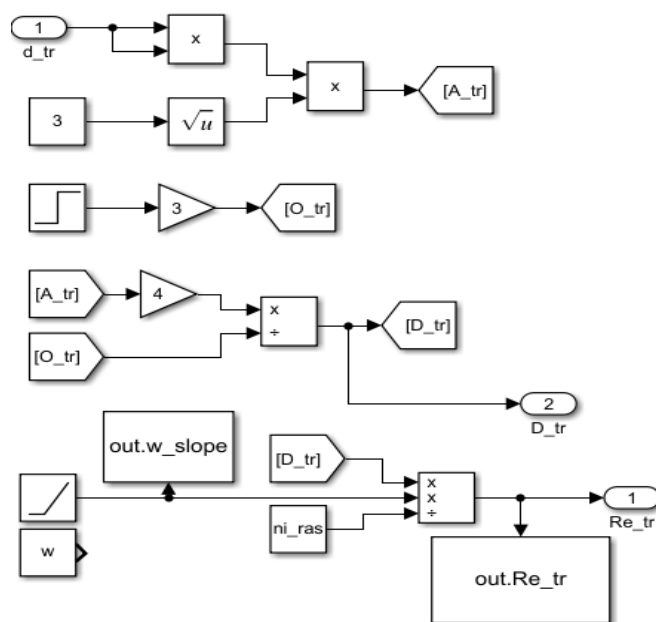
### 3.2.1. Model u MATLAB / Simulinku

#### 3.2.1.1. Model u MATLAB / Simulinku za trokutni poprečni presjek



Slika 14. Simulink model za trokutni presjek

Na slici 14 prikazana je shema svih blokova koji se koriste u izračunu odvedenoga toplinskoga toka iz sustava kod trokutnog presjeka. Prvo je potrebno izračunati  $Re$  koji se računa prema blok shemi na slici 15.  $Re$  ovisi o brzini strujanja rashladne tvari, dinamičkoj viskoznosti rashladne tvari te o promjeru kanala, a kako trokutni kanal nema okrugli presjek uzima se ekvivalentni promjer koji se računa prema formuli (3.4) koja će biti detaljnije objašnjena u odlomku 3.2.2.



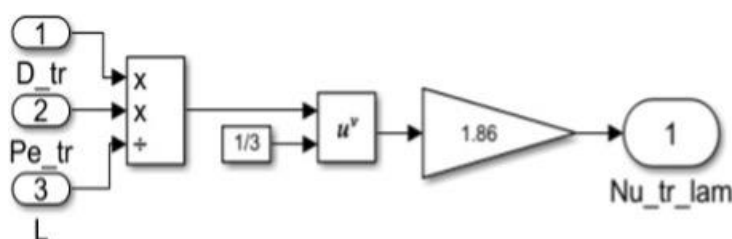
**Slika 15.** Simulink model za  $Re$  za trokutni presjek

Slika 15. predstavlja zeleni blok na slici 14. Na slici 15. detaljno je prikazan postupak izračuna  $Re$  za trokutni presjek kanala za rashladnu tekućinu. Kao što je vidljivo iz slike 15. ulazni parametar za računanje  $Re$  je duljina stranice trokutnog kanala, a što je za dubinu kanala od 1,6 mm jednako 1,85 mm.

Slijedi izračun površine poprečnog presjeka trokutnog kanala kojega se lako izračuna poznatim formulama za površinu jednakostraničnog trokuta. Površina jednakostraničnog trokuta jednaka je kvadratu stranice jednakostraničnog trokuta uvećan za korijen broja 3. Zatim u proračunu slijedi izračun opsega jednakostraničnog trokuta koji je jednak zbroju stranica trokuta, pa tako površina trokutnog presjeka prema opisanom postupku iznosi 5,93 mm<sup>2</sup>, a opseg 5,55 mm.

Iz tih podataka dobiva se vrijednost ekvivalentnog promjera tako što se površinu jednakostraničnog trokuta uveća 4 puta i podijeli ju se s opsegom kao što je prikazano blokom na slici 15.  $D_{ekv}$  za ovaj slučaj iznosi 4,27 mm.  $Re$  se izračuna tako što se  $D_{ekv}$  podijeli s kinematičkom viskoznošću  $\nu$ , koja je značajka rashladne tvari pa ona nije faktor koji se može korigirati, i pomnoži se s brzinom protoka rashladne tekućine koja će se u daljnjoj analizi mijenjati ovisno o potrebama hlađenja sustava.

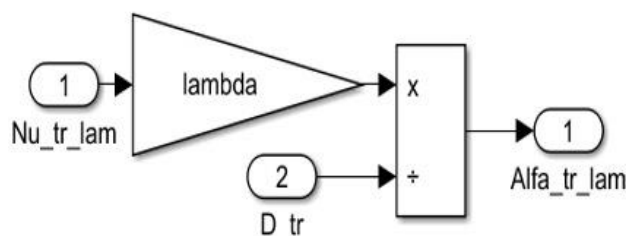
Nakon izračuna  $Re$ , sustav se grana na dva područja. Područje s vrijednostima  $Re$  manjima od 3000 računaju se prema modelu za laminarno strujanje, a za vrijednosti veće od 3000 prema modelu za turbulentno strujanje. Modeli za turbulentno i laminarno strujanje se značajno razlikuju pa će se tako razlikovati i iznosi odvedenog toplinskog toka iz sustava ovisno po kojem modelu će se on računati. Nadalje slijedi izračun Nusseltovog broja ( $Nu$ ) koji će poslužiti za izračun  $\alpha$ , koeficijenta konvektivnog prijelaza topline.



**Slika 16.** Simulink model za  $Nu$  za trokutni presjek pri laminarnome strujanju

Slika 16. prikazuje smeđi blok na slici 14, a ovim modelom je prikazan izračun  $Nu_{lam}$  prema formuli (3.2) u MATLAB / Simulink programskom paketu. Prema prikazanome postupku se računa  $Nu$  ukoliko  $Re$  ispada manji od 3000, a što je slučaj kada je u strujanju dominantan laminarni oblik strujanja. Za izračun  $Nu_{lam}$  potrebno je izračunati Pecletovu značajku ( $Pe$ ) koja se računa prema bloku prikazanom na slici [14]. Vidljivo je da  $Nu_{lam}$  ovisi o ekvivalentnom promjeru trokutnog kanala,  $Pe$  i o ukupnoj dužini rashladnog kanala  $L$ .  $Nu$  za laminarno strujanje računa se prema formuli (3.2) [14].

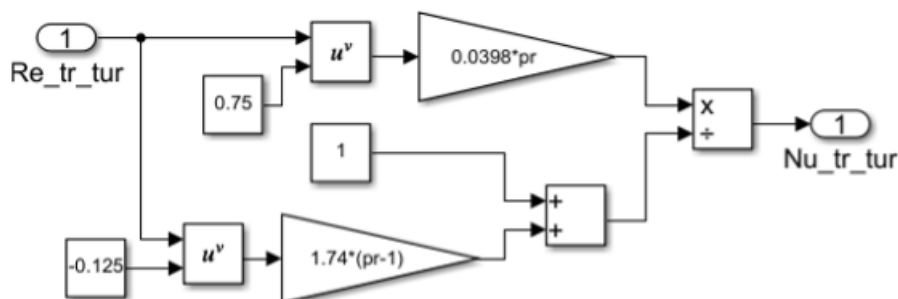
$$Nu_{lam} = 1,86 \left( Pe \frac{D_{ekv}}{L} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.2)$$



**Slika 17.** Simulink model za alfu za trokutni presjek pri laminarnome strujanju



Slika 17. prikazuje svijetlo plavi blok na slici 14. i predstavlja model po kojemu se računa koeficijent konvektivnog prijelaza topline pri laminarnom strujanju za trokutni oblik kanala za rashladnu tekućinu. Koeficijent konvektivnog prijelaza topline dakle ovisi o  $Nu$ , toplinskoj vodljivosti rashladnoga sredstva i ekvivalentnom promjeru. Što je koeficijent konvektivnog prijelaza topline,  $\alpha$ , veći to je sustav hlađenja učinkovitiji jer rashladna tekućina na sebe može preuzeti veći toplinski tok koji se može odvesti iz sustava. Kako je vidljivo iz slike 17., koeficijent konvektivnog prijelaza topline raste s porastom  $Nu$  i toplinskom vodljivosti, a pada što je ekvivalentni promjer kanala veći.

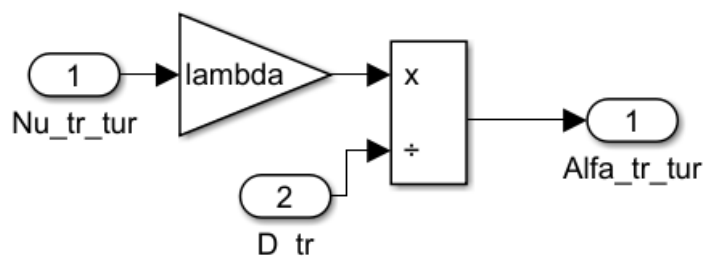


**Slika 18.** Simulink model za  $Nu$  za trokutni presjek pri turbulentnome strujanju

Slika 18. predstavlja model u MATLAB / Simulink programskom paketu za izračun  $Nu_{tur}$  prema formuli (3.3), a prikazana je crvenim blokom na slici 14. Prema prikazanome postupku se računa  $Nu$  ukoliko je  $Re$  veći od 3000, a što je slučaj kada je u strujanju dominantan turbulentni oblik strujanja. Vidljivo je da se izračun  $Nu$  za turbulentno strujanje (slika 18) razlikuje od onoga za laminarno strujanje (slika 16).  $Nu$  za turbulentno strujanje ovisi o Prandtlovoj značajki ( $Pr$ ) i  $Re$ .  $Pr$  ovisi o dinamičkoj viskoznosti  $\mu$ , specifičnom toplinskom kapacitetu  $c_p$  i toplinskoj vodljivosti  $\lambda$  rashladnog sredstva.  $Pr$  dakle ovisi o značajkama rashladne tekućine i mijenja se s temperaturom rashladne tekućine. No kako sustav opisan u ovom radu neće mijenjati značajno temperaturu rashladne tekućine,  $Pr$  će se zbog jednostavnijeg proračuna smatrati konstantnom vrijednošću, a bit će uzete vrijednosti rashladne tekućine za temperaturu od 30 °C [13].

$Nu$  za trokutni profil pri turbulentnome strujanju se računa prema formuli (3.3) [14]:

$$Nu_{tur} = \frac{0,0398 Pr Re^{0,75}}{1 + 1,74 Re^{-0,125}(Pr-1)} \quad (3.3)$$



**Slika 19.** Simulink model za alfu za trokutni presjek pri turbulentnome strujanju

Model na slici 19. označen je kao tamno plavi blok na slici 14. te predstavlja model po kojemu se računa koeficijent konvektivnog prijelaza topline pri turbulentnom strujanju za trokutni oblik kanala za rashladnu tekućinu. Iz slika 17 i 19 jasno se vidi da za izračun konvektivnog koeficijenta prijelaza topline nema razlike između laminarnog i turbulentnog modela osim u pogledu  $Nu$  kojega se uvrštava ovisno o tome koji oblik strujanja je dominantniji.

Sličan model u MATLAB / Simulink programskom paketu dobiva se za kvadratni i polukružni oblik. Jedine značajne razlike pojaviti će se pri izračunu  $Re$  zbog same geometrije kanala za rashladnu tekućinu, a što se prikazuje zamjenom indeksa uz fizikalne veličine koje simboliziraju trokut u indekse za kvadrat i polukrug. Dakako, zbog promjene geometrije kanala doći će i do promjene svih ostalih vrijednosti bitnih za proračun pošto one ovise o ekvivalentnom promjeru kanala za rashladni medij [14].

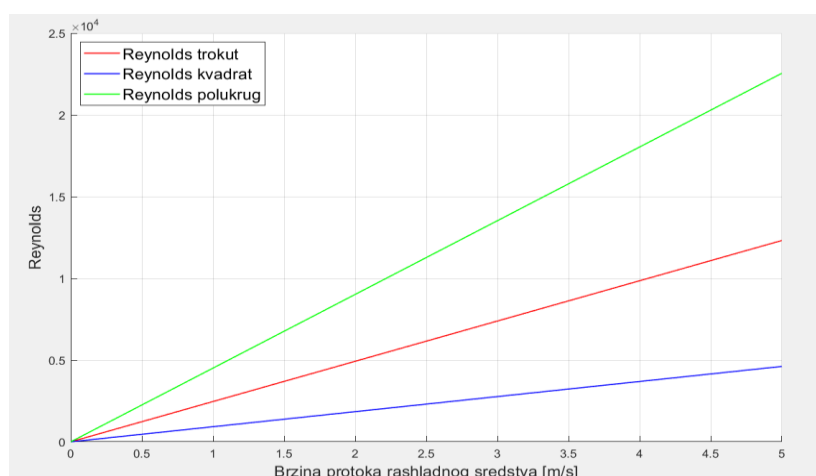
### 3.2.2. Analiza dobivenih rezultata

Nakon što su u MATLAB / Simulink modelu uneseni svi potrebni podatci, bilo je potrebno odrediti graničnu brzinu strujanja pri kojoj rashladna tekućina prelazi iz laminarnog u turbulentno strujanje. Ovisno o geometriji presjeka, za svaki od odabrana tri profila je ta granična brzina drugačija. Daljnji proračun se provodio preko ekvivalentnog promjera  $D_{ekv}$  koji se izračunava tako da se površinu  $A$  poprečnog presjeka uveća četiri puta i podijeli s njegovim opsegom  $O$  [14].

$$D_{ekv} = \frac{4A}{O} \quad (3.4)$$

S ekvivalentnim promjerom je izračunat  $Re$  prema modelu strujanja rashladne tekućine kroz cijev. Granična vrijednost  $Re$  za ovakav slučaj je 3000. Za vrijednosti  $Re$  manje od 3000, strujanje se može smatrati laminarnim, a za  $Re$  veće od 3000 strujanje se smatra turbulentnim [14]. Ovaj podatak je bitan jer se daljnji proračun razlikuje ovisno o tome je li strujanje laminarno ili turbulentno. Uz  $D_{ekv}$ ,  $Re$  će ovisiti o brzini protoka rashladnog sredstva kroz cijev  $w$  i kinematičkoj žilavosti  $\nu$  koja za odabranu smjesu i za temperature oko 30 °C iznosi  $1,734 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  [13].  $Re$  se proračunava prema slijedećoj jednačbi [13]:

$$Re = \frac{w \cdot D_{ekv}}{\nu} \quad (3.5)$$



**Slika 20.** Graf ovisnosti  $Re$  o brzini strujanja kroz cijev

Na slici 20. prikazan je graf koji zorno prikazuje omjer  $Re$  i brzine protoka rashladne tekućine,  $w$ .  $Re$  se mijenja linearno s promjenom brzine protoka rashladne tekućine (3.5) pa se to na slici 20 očituje pravcima. Kada bi se u obzir uzele i promjene značajki rashladne tekućine dobilo bi se malo odstupanje od prikaza na slici 20. No ona su zanemariva jer su promjene temperature na izlazu i ulazu rashladne tekućine za ovaj slučaj hlađenja vrlo male. Najbrži porast vrijednosti  $Re$  s brzinom protoka rashladne tvari primjećuje se za polukružni oblik rashladnih kanala te će on prvi prijeći iz dominantno laminarnog u dominantno turbulentno područje strujanja. Zatim po brzini prelaska iz laminarnog u turbulentni režim strujanja slijedi trokutni presjek rashladnih kanala.

Najsporije s brzinom protoka rashladne tekućine raste  $Re$  za kvadratni presjek pa je na slici 20 njegov pravac najmanjeg nagiba. Područje koje se promatra ograničeno je do brzine strujanja rashladne tekućine od 5 m/s te za to područje najveći  $Re$  postiže polukružni presjek i on iznosi 22500, zatim slijedi trokutni presjek sa vrijednosti  $Re$  od 12300, a najmanju vrijednost  $Re$  za  $w$  od 5 m/s postiže kvadratni presjek i on iznosi 4610. Dakle, pri brzini protoka rashladne tekućine od 5 m/s sva tri presjeka nalaze se u dominantno turbulentnom području strujanja. Postavlja se pitanje pri kojoj će brzini strujanje prijeći iz dominantno laminarnog u dominantno turbulentni režim strujanja.

Brzinu protoka rashladne tekućine u kojoj će turbulentno strujanje postati dominantnije od laminarnog naziva se graničnom brzinom strujanja  $w_{gr}$ . Granična brzina strujanja rashladne tekućine kroz kanal ovisi o geometriji kanala i ona se određuje tako da  $Re$  bude 3000 [14]. Može se zaključiti kako će najmanju graničnu brzinu strujanja imati polukružni presjek, zatim trokutni presjek, a najveću kvadratni presjek rashladnih kanala.

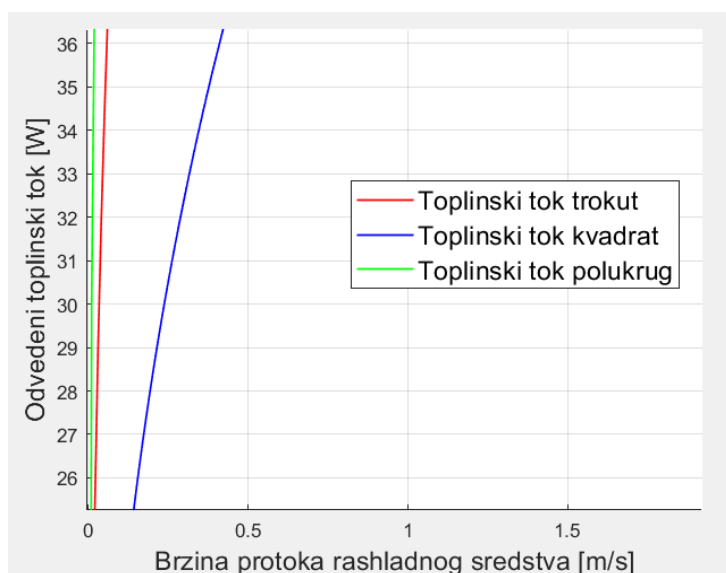


**Slika 21.** Granična brzina strujanja kroz cijev pri laminarnome strujanju

Iz grafa na slici 21. vidljivo je da kod polukružnog presjeka strujanje prelazi iz laminarnog u turbulentno pri najmanjoj brzini strujanja kroz cijev od ova tri profila. Dakle, za polukružni presjek granična brzina strujanja iznosi 0,665 m/s. Zatim je prikazano kako granična brzina za trokutni presjek iznosi 1,219 m/s, dok kvadratni presjek ima najveću graničnu brzinu strujanja kroz cijev i ona iznosi 3,25 m/s.

Iz prikazanih rezultata vidljivo je koliko je geometrija kanala bitna za daljnji proračun. Može se već sada zaključiti da će se najintenzivnije hlađenje postići s polukružnim oblikom kanala za rashladnu tvar.

Slijedi izračun brzine strujanja pri kojoj će se postići odvodnja potrebnog toplinskog toka kod svakog od odabrana tri presjeka. Potrebno je odvesti toplinski tok vrijednosti 33,3 W po pojedinoj bipolarnoj ploči. Pri tome će se razlika temperatura na ulazu i izlazu rashladne tekućine držati konstantnom na 2 °C. Za pretpostaviti je da će za odvođenje ovako malog toplinskog toka biti primjerena vrlo mala brzina strujanja rashladnog sredstva pa će se ovaj dio proračuna provoditi po modelu prisilne konvekcije kroz cijev za laminarno strujanje. Kako je prikazano u prošlom odlomku modelom u MATLAB / Simulinku, koeficijent konvektivnog prijelaza topline  $\alpha_{lam}$  pri laminarnom strujanju izračunat će se iz  $Nu$  za laminarno strujanje koji se dobiva također po modelu prikazanom u prošlom odlomku (3.2) [14]. Nadalje,  $\alpha_{lam}$  ovisi o toplinskoj vodljivosti  $\lambda$  za rashladnu tvar koja za ovaj slučaj iznosi 0,466 W/m K te o ekvivalentnom promjeru koji predstavlja faktor koji pokazuje koliko je oblik kanala bitan za daljnji proračun.



**Slika 22.** Odvedeni toplinski tok pri razlici temperatura rashladne tvari od 2 °C

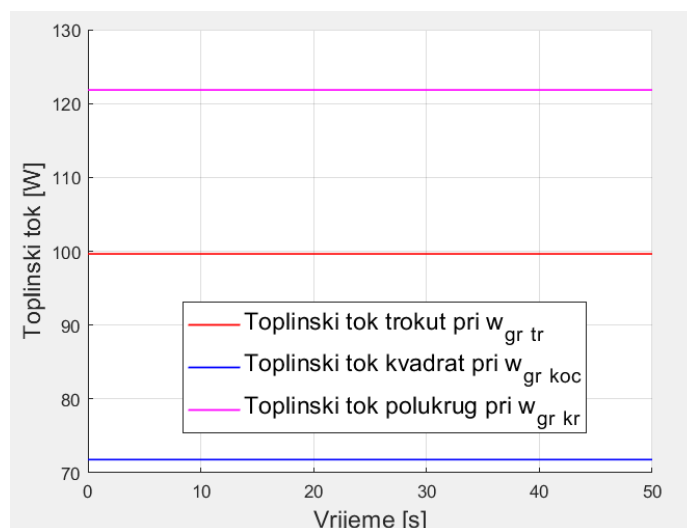
Potrebni toplinski tok će se odvoditi pri najmanjoj brzini strujanja kod polukružnog presjeka kanala koja iznosi 0,02 m/s što je prikazano zelenom krivuljom na slici 22.

Zatim slijedi trokutni poprečni presjek rashladnog kanala koji potrebni toplinski tok odvodi pri brzini strujanja od 0,045 m/s što je također vidljivo iz crvene krivulje na grafu na slici 22., dok će najveću brzinu strujanja za odvodnju potrebnog toplinskog toka zahtijevati kvadratni presjek koja iznosi 0,32 m/s, a što je prikazano plavom krivuljom na slici 22.

Iz priloženih rezultata vidi se da je razlika u brzini strujanja rashladnog sredstva koja je potrebna za odvodnju toplinskoga toka kroz ova tri profila kanala značajno različita. Za odvodnju potrebnoga toplinskoga toka trokutni presjek zahtijeva malo više od duple brzine strujanja za odvodnju istoga toplinskoga toka polukružnim oblikom kanala, dok kvadratni presjek zahtijeva 16 puta veću brzinu strujanja od polukružnog kanala. Može se zaključiti da je kvadratni presjek kanala daleko najnepovoljniji za hlađenje svežnja.

Kada bi se stavila veća razlika ulazne i izlazne temperature rashladne tvari, brzina kojom mora strujati rashladno sredstvo bi se još više smanjila. Krajnji slučaj bio bi da je izlazna temperatura rashladnoga sredstva jednaka temperaturi stjenke kanala. Tada bi potrebna brzina strujanja rashladne tekućina postala zanemariva.

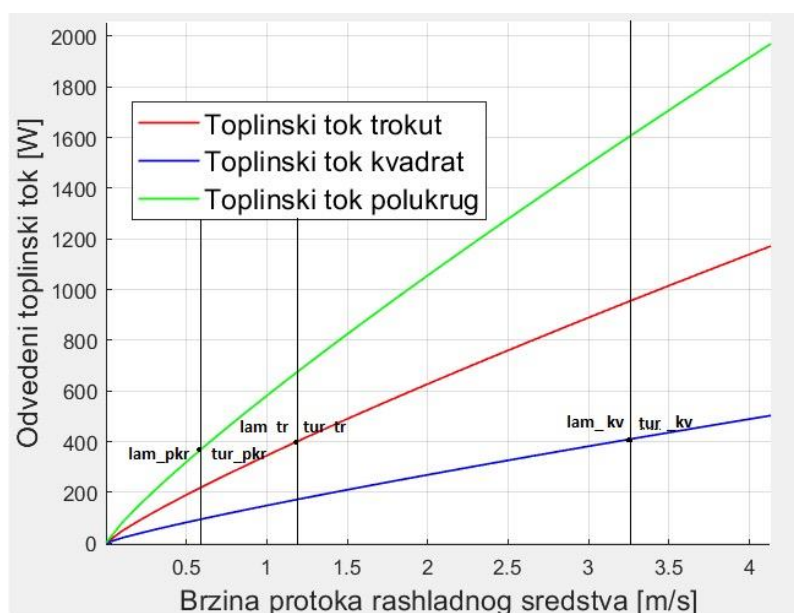
Postavlja se pitanje koliki je toplinski tok koji je moguće odvesti ovim modelom iz sustava, a da je u sustavu i dalje prisutno dominantno laminarno strujanje rashladne tekućine. Ti rezultati su dobiveni tako što se je za svaki od presjeka u proračun uvrstila granična brzina strujanja rashladne tekućine koja za polukružni presjek rashladnog kanala iznosi 0,02 m/s, za trokutni presjek rashladnog kanala 0,045 m/s, te za kvadratni presjek 0,32 m/s.



**Slika 23.** Mogući odvedeni toplinski tok pri graničnim brzinama

Toplinski tok koji se može odvesti iz sustava pri razlici temperatura na ulazu i izlazu rashladne tvari od 2 °C i pri laminarnom strujanju za kvadratni presjek iznosi 71,8 W, za trokutni presjek iznosi 99,8 W, a za polukružni presjek je najveći i iznosi 122 W, kao što je prikazano na slici 23. Ove razlike nisu značajne kada se uzme u obzir da je granična brzina strujanja rashladne tekućine trokutnog profila veća za duplo, a kvadratnog veća za pet puta od polukružnog. Tako ispada da se gotovo jednak toplinski tok odvodi pri znatno različitim brzinama strujanja rashladne tekućine.

Iz svega prikazanoga vidljivo je da je sustav za hlađenje dostatan za odvodnju potrebnoga toplinskoga toka i da će raditi u laminarnom području. No postavlja se pitanje kolika bi bila njegova učinkovitost kada bi sustav radio u zoni turbulentnog strujanja rashladne tekućine. Iako ovaj proračun nije značajno bitan za odabrani problem, slijedi analiza turbulentnog strujanja u kanalima za rashladnu tekućinu. Koeficijent konvektivnog prijelaza topline  $\alpha_{tur}$  pri turbulentnom strujanju izračunat će se iz  $Nu$  za turbulentno strujanje koji se dobiva također po modelu prikazanom u prošlom odlomku (3.3) [14]. Kako pri laminarnome tako i kod turbulentnog strujanja koeficijent konvektivnog prijelaza topline ovisi još i o toplinskoj vodljivosti  $\lambda$  za rashladnu tvar koja za ovaj slučaj iznosi 0,466 W/m K te o ekvivalentnom promjeru  $D_{ekv}$ .



Slika 24. Toplinski tok pri graničnoj brzini strujanja za turbulentno područje

Kako je vidljivo iz grafa na slici 24., i u turbulentnom području strujanja najpovoljniji profil po pitanju odvodnje toplinskoga toka je kanal polukružnog poprečnog presjeka, a najnepovoljniji kvadratni presjek kanala rashladnoga sredstva. Također se može primijetiti da će polukružni presjek prijeći u zonu turbulentnog područja pri graničnoj brzini strujanja od 0,665 m/s. Po turbulentnome modelu je toplinski tok pri toj graničnoj brzini kod polukružnog presjeka kanala rashladne tvari tri puta veći nego što je to slučaj kod laminarnoga strujanja i iznosi 363 W.

Za kvadratni presjek kanala vidi se da pri njegovoj graničnoj brzini strujanja rashladne tvari od 1,219 m/s odvedeni toplinski tok iznosi 402 W, a pri toj brzini strujanja polukružni profil može odvesti toplinski tok od 684 W. Dakle, prema turbulentnom modelu za istu graničnu brzinu kod trokutnoga presjeka kanala za rashladnu tvar odvodi se toplinski tok četiri puta veći nego što je dobiven laminarnim modelom.

Kod kvadratnoga kanala turbulentno strujanje dominira pri većoj brzini strujanja rashladne tvari na 3,25 m/s. Pri toj graničnoj brzini za kvadratni kanal prema turbulentnome modelu strujanja mogući odvedeni toplinski tok je 413 W što je šest puta više nego prema laminarnome modelu strujanja. Pri toj graničnoj brzini strujanja za kvadratni presjek mogući odvedeni tok za polukružni presjek kanala za rashladnu tvar je 1613 W, a kod trokutnoga presjeka 757 W. Iz ovoga zadnjega primjera se najbolje može dočarati koliko geometrija kanala za rashladnu tvar ima važnu ulogu u odvođenju toplinskoga toka.

Ako se uvede pretpostavka da su troškovi izrade kanala u bipolarnoj ploči za odabrana tri oblika poprečnoga presjeka kanala za rashladnu tekućinu jednaki, optimalan sustav će biti polukružnog poprečnog presjeka. Sustav će se dakle hladiti rashladnom tekućinom, odnosno smjesom etilena (31,6%) i glikola (64,4%) navedenih množinskih koncentracija. Iz sustava je potrebno odvoditi toplinski tok od 33 W, a što se za polukružni poprečni presjek rashladnih kanala postiže pri brzini protoka rashladne tekućine od 0,02 m/s.

Iz svega prikazanoga jasno je kako bi se ovim sustavom hlađenja moglo vrlo lako uz korekciju nekih od parametara, poput povećanja razlike ulazne i izlazne temperature rashladne tvari ili povećanja brzine protoka rashladne tekućine kroz cijev, mogla postići puno značajnija odvodnja toplinskoga toka. Ovakvi rezultati bili su za očekivati jer niskotemperaturni svežanj PEM gorivnih članaka radi na vrlo niskim temperaturama pa je i toplinski tok koji je potrebno odvoditi mali.



Dakle, ova analiza pruža dobar uvid u to kako bi se sustav za hlađenje rashladnom tekućinom mogao primijeniti za hlađenje visokotemperaturnoga svežnja vodikovih gorivnih članaka koji rade pri značajno višim temperaturama. Pri tome bi se u obzir morale uzeti još i promjene značajki rashladne tekućine ovisno o temperaturi jer bi došlo do značajnijega zagrijavanja rashladne tekućine od ulaska do izlaska iz sustava. Bilo bi zanimljivo nadopuniti provedenu analizu tako što bi se mijenjala dubinu kanala za rashladnu tvar. Za pretpostaviti je da bi i kod različitih dubina kanala polukružni presjek imao najbolje značajke bitne za hlađenje sustava.

## Zaključak

Za niskotemperaturne svežnjeve vodikovih gorivnih članaka srednje i velike snage optimalan sustav hlađenja je rashladnom tekućinom jer zračno hlađenje nema dovoljan intenzitet hlađenja. Uzrok tome je mala razlika između radne temperature i temperature okolišnoga zraka.

Prelaskom na visokotemperaturne svežnjeve ta temperaturna razlika će se povećati pa će zračno hlađenje biti primjenjivo za visokotemperaturne svežnjeve manjih snaga. Međutim, i dalje će hlađenje rashladnom tekućinom imati prednost nad zračnim hlađenjem zbog same rashladne tvari koja ima znatno bolje značajke od zraka. Pojavit će se i prilika da se otpadna toplina koristi za grijanje nekog sekundarnog sustava jer će visokotemperaturni svežanj otpuštati značajniju toplinu od niskotemperaturnoga.

Kada se do kraja razvije i u praksi počne masovno koristiti visokotemperaturni svežanj vodikovih gorivnih članaka, model hlađenja analiziran u ovom radu dobit će na značaju jer će biti potrebno odvoditi značajniji iznos toplinskog toka iz svežnja, a što će se vrlo lako prilagoditi ranije spomenutim parametrima.

Prema svemu što je u ovoj analizi prikazano za odabrani sustav niskotemperaturnoga svežnja PEM gorivnih članaka, optimalnim se pokazao polukružni profil kanala za rashladnu tvar iako i ostali profili bez problema mogu odvoditi potrebni toplinski tok.

## LITERATURA

- [1] [Kreuer KD. On the complexity of proton conduction phenomena. Solid State Ionics 2000;136-137:149-60.](#)
- [2] [Bazylak A. Liquid water visualization in PEM fuel cells: a review. Int J Hydrogen Energy 2009;34:3845-57.](#)
- [3] [A review of high-temperature proton exchange membrane fuel cell \(HT-PEMFC\) system.](#)
- [4] [Devanathan R. Recent developments in proton exchange membranes for fuel cells. Energy & Environ Sci 2008;1:101-19.](#)
- [5] [Chandan A, Hattenberger M, El-kharouf A, Du S, Dhir A, Self V, et al. High temperature \(HT\) polymer electrolyte membrane fuel cells \(PEMFC\) e a review. J Power Sources 2013;231:264-78.](#)
- [6] [Xu H, Song Y, Kunz HR, Fenton JM. Operation of PEM fuel cells at 120e150C to improve CO tolerance. J Power Sources 2006;159:979-86.](#)
- [7] [Thermal analysis of air-cooled PEM fuel cells.](#)
- [8] [Liquid cooling techniques in proton exchange membrane fuel cell stacks: A detailed survey.](#)
- [9] [Flow channel shape optimum design for hydroformed metal bipolar plate in PEM fuel cell.](#)
- [10] [Inexpensive dielectric coolant for fuel cell stacks.](#)
- [11] [S.C. Mohapatra, Fuel Cell and Fuel Cell Coolant Compositions, Google Patents, 2006.](#)
- [12] [Modeling of the air-cooled PEM fuel cell\\_Kristián Ondrejčka\\* Viktor Ferencey\\* Michal Stromko\\*.](#)
- [13] [CoolProp program korišten za pronalaženje svojstva rashladne tvari](#)
- [14] [Termodinamika II, Antun Galović](#)
- [15] [Modeli potrebni za analizu izrađeni u MATLAB / Simulink paketu](#)