

# Leidenfrost efekt

---

Ovčariček, Valentino

Master's thesis / Diplomski rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:809109>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-10-03**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**PRIRODOSLOVNO–MATEMATIČKI FAKULTET**  
**MATEMATIČKI ODSJEK**

Valentino Ovčariček

**LEIDENFROST EFEKT**

Diplomski rad

Voditelj rada:  
doc. dr. sc. Nikola Poljak

Zagreb, RUJAN, 2019

Ovaj diplomski rad obranjen je dana \_\_\_\_\_ pred ispitnim povjerenstvom u sastavu:

1. \_\_\_\_\_, predsjednik
2. \_\_\_\_\_, član
3. \_\_\_\_\_, član

Povjerenstvo je rad ocijenilo ocjenom \_\_\_\_\_.

Potpisi članova povjerenstva:

1. \_\_\_\_\_
2. \_\_\_\_\_
3. \_\_\_\_\_

*From the sage  
on the stage  
to the guide  
on the side.*

# Sadržaj

<b>Sadržaj</b>	<b>iv</b>
<b>Uvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Teorijski uvod</b>	<b>2</b>
1.1 Prijenos topline . . . . .	2
1.2 Leidenfrost efekt . . . . .	6
1.3 Obrnuti Leidenfrost efekt . . . . .	13
1.4 Primjena Leidenfrostova efekta . . . . .	13
<b>2 Metoda mjerenja i eksperimentalni postav</b>	<b>15</b>
<b>3 Obrada rezultata</b>	<b>20</b>
<b>4 Zaključak</b>	<b>26</b>
<b>Bibliografija</b>	<b>28</b>

# Uvod

Leidenfrostov efekt je pojava pri kojoj tekućina, u bliskom dodiru s tijelom znatno više temperature od same tekućine i njena vrelišta, stvara izolacijski sloj od isparenog, tankog donjeg dijela kapi koji zbog svoje niske toplinske vodljivosti usporava inače brzo vrenje tekućine. Ova pojava se često može vidjeti pri prolijevanju vode po znatno zagrijanoj tavi; ako je temperatura tave iznad ili na *Leidenfrostovoj točki* (pri normalnim uvjetima točka je varijabilno iznad vrelišta vode), kapljice će "plesati" po tavi te će biti potrebno nešto više vremena za isparavanje nego što bi bilo potrebno da je temperatura tave ispod Leidenfrostove točke, čak i ako je temperatura nešto iznad temperature vrelišta. Ista pojava se može uočiti pri izlivanju tekućeg dušika; pod igra ulogu značajno toplije mase u dodiru s kojom znatno hladniji tekući dušik stvara izolacijski sloj. Pri nekim demonstracijama izvode se ekstremniji primjeri kao što je umakanje mokrog prsta u tekuće olovo ili prskanje tekućeg dušika iz usta. Efekt je nazvan po Johannu Gottlobu Leidenfrostu, koji je o njemu raspravio u *Raspravi o pojedinim kvalitetama obične vode* 1756. godine.

# Poglavlje 1

## Teorijski uvod

### 1.1 Prijenos topline

#### Toplina

Interakcija koja uzrokuje promjene temperature dviju tvari koje su u međusobnom kontaktu je u osnovi prijenos energije iz jedne tvari u drugu. Prijenos energije koji se odvija samo zbog razlike temperature naziva se toplinski tok ili prijenos topline, a energija prenesena na taj način naziva se toplina. Iz tog razloga za toplinu se može reći da je ona energija u prijelazu. Možemo definirati jedinicu količine topline na temelju temperaturnih promjena kod nekih specifičnih materijala. Kalorija (cal) definirana je kao količina topline koja je potrebna jednom gramu vode da mu se temperatura promijeni za jedan stupanj. Kalorija nije osnovna SI jedinica, a kako je toplina zapravo energija, tad se kao standardna mjerna jedinica uzima džul (J). Kalorija i džul su međusobno povezani na način da je  $1\text{cal}=4.186\text{J}$ . Za količinu topline koristimo simbol  $Q$ . Količina topline  $Q$  koja je potrebna za povećanje temperature mase  $m$  određenog materijala od temperature  $T_1$  do temperature  $T_2$  je proporcionalna promjeni temperature  $\Delta T$  ( $\Delta T = T_2 - T_1$ ) te masi  $m$  materijala. Samim time dobivamo relaciju  $Q = mc\Delta T$ , pri čemu  $c$  toplinski kapacitet koji ovisi o materijalu.

#### Načini prijenosa topline

Načelno postoje dvije vrste tvari kad govorimo o prijenosu topline. To su vodiči i izolatori, odnosno materijali koji dopuštaju ili sprječavaju prijenos topline između tijela. Tri mehanizma prijenosa topline su kondukcija ili provođenje, konvekcija ili strujanje te radijacija ili zračenje. Kondukcija ili provođenje se odvija unutar tijela ili između dva tijela u dodiru. Konvekcija ili strujanje ovisi o kretanju mase iz jednog područja prostora u drugo, dok je radijacija ili zračenje prijenos topline elektromagnetskim zračenjem, kao što je sunčeva

svjetlost, bez potrebe da materija bude prisutna u prostoru između tijela. U ovom radu malo više pažnje posvetit ćemo prijenosu topline kondukcijom i radijacijom.

### Kondukcija

Postoje dva tipa prijenosa topline kondukcijom, pomoću atoma i pomoću slobodnih elektrona. Atome možemo zamisliti kao vezane harmoničke oscilatore. Atomi koji imaju veću kinetičku energiju nalaze se na području više temperature te titraju jače nego atomi s manjom kinetičkom energijom i na taj način prenose energiju na svoje susjede. Susjedi guraju svoje susjede i tako dalje kroz materijal. Sami atomi ne prelaze iz jednog dijela materijala u drugi, već se prenosi njihova energija. Puno efikasniji način prijenosa energije za većinu metala je pomoću slobodnih elektrona. Unutar metala postoje slobodni elektroni koji se mogu gibati kroz kristalnu rešetku te na taj način prenose energiju s mjesta više temperature do mjesta niže temperature. Prisutnost slobodnih elektrona je zaslužna i za to da je većina metala dobar vodič topline. Prijenos topline odvija se uvijek kad postoji razlika u temperaturi između dva područja. Smjer toka topline je uvijek s mjesta više na mjesto niže temperature. Smjer nam pokazuje temperaturni gradijent, u ovom slučaju 1D kad se količina topline  $\delta Q$  prenese kroz dno posude u vremenu  $\delta t$ , tad je brzina toka topline jednaka  $\frac{\delta Q}{\delta t}$ . Tu brzinu nazivamo toplinskom strujom te ju označavamo s  $H$ . Toplinska struja je proporcionalna površini poprečnog presjeka područja kontakta  $A$ , koeficijentu termalne vodljivosti  $k$ , razlici temperature  $T_H - T_O$ , pri čemu je  $T_H$  temperatura donje strane posude, a  $T_O$  temperatura gornje strane posude, te je uz to  $H$  obrnuto proporcionalan debljini područja kontakta  $d$ . Dolazimo do sljedećeg izraza za vodljivu struju:

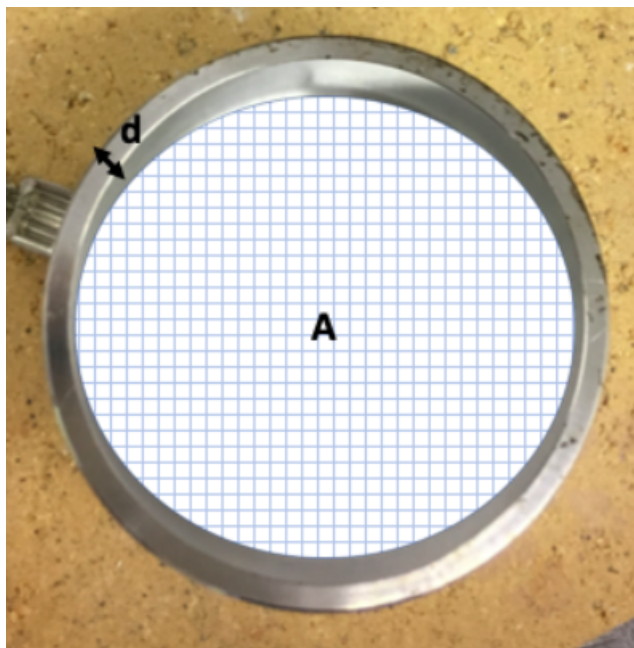
$$H = \frac{\delta Q}{\delta t} = kA \left( \frac{T_H - T_O}{d} \right). \quad (1.1)$$

Razliku temperature po jedinici duljine  $\frac{T_H - T_O}{d}$  nazivamo temperaturni gradijent te ga označavamo s  $\frac{\delta T}{\delta z}$ . Brojčana vrijednost koeficijenta termalne vodljivosti ovisi o materijalu područja kontakta. Materijali velike termalne vodljivosti su dobri vodiči topline, dok oni s malom termalnom vodljivošću su loši vodiči, odnosno izolatori. Ako se temperatura mijenja na neujednačen način duž područja kontakta, unosimo koordinatu  $z$  duž debljine i generaliziramo temperaturni gradijent sa  $\frac{dT}{dz}$ . Odgovarajuća generalizacija jednadžbe (1.1) je

$$H = \frac{dQ}{dt} = -kA \left( \frac{dT}{dz} \right), \quad (1.2)$$

pri čemu negativni predznak pokazuje da toplina teče u smjeru pada temperature.





Slika 1.1: Na slici je prikazana posuda vodljivog materijala, aluminijska poprečnog presjeka  $A$  i debljine  $d$ .

Možemo integrirati formulu (1.2) te dobivamo koliko topline neko tijelo primi u vremenu  $t$ .

$$Q = kA \left( \frac{T_H - T_O}{d} \right) t \quad (1.3)$$

Količina topline koju neko tijelo primi ovisi i o specifičnom toplinskom kapacitetu. Specifični toplinski kapacitet nam govori koliko treba dovesti topline tijelu mase jednog kilograma da bi mu se temperatura promijenila za jedan stupanj.

$$c = \left( \frac{1}{m} \right) \left( \frac{dQ}{dT} \right) \quad (1.4)$$

Na taj način dobivamo izraz za primljenu ili predanu toplinu:

$$\Delta Q = mc\Delta T. \quad (1.5)$$

### Radijacija

Radijacija je prijenos topline elektromagnetskim valovima kao što su vidljiva svjetlost, infracrveno i ultraljubičasto zračenje. Ovakav način prijenosa topline događa se i u vakuumu. Svako tijelo, čak i pri sobnoj temperaturi, emitira energiju u obliku elektromagnetskog

zračenja. Na otprilike 20 stupnjeva Celzija gotovo se sva energija prenosi infracrvenim valovima, valnih duljina mnogo duljih od valova vidljive svjetlosti. Kako temperatura raste, valne duljine se smanjuju. Na 800 stupnjeva Celzija tijelo emitira dovoljno vidljivog zračenja te samim time izgleda "crveno", dok na 3000 stupnjeva Celzija zračenje sadrži dovoljno vidljive svjetlosti da ono izgleda "bijelo". Brzina zračenja energije s površine je proporcionalna površini tijela  $A$  i četvrtoj potenciji apsolutne temperature. Brzina također ovisi i o prirodi površine, ta se ovisnost opisuje veličinom  $\epsilon$  koja se naziva emisivnost. Emisivnost je bezdimenzionalna veličina između 0 i 1, a predstavlja omjer brzine zračenja određene površine i brzine zračenja iz jednake površine idealne površine zračenja pri istoj temperaturi. Na taj način emisivnost ovisi i o temperaturi, tako se toplinska struja  $H$ ,  $H = \frac{\delta Q}{\delta t}$ , pri zračenju površine  $A$  s emisivnošću  $\epsilon$  pri apsolutnoj temperaturi može izraziti kao

$$H = A\epsilon\sigma T^4, \quad (1.6)$$

pri čemu je  $\sigma$  temeljna fizikalna konstanta, koju još nazivamo i Stefan-Boltzmannova konstanta. Relacija (1.6) se još naziva i Stefan-Boltzmannov zakon. Vrijednost  $\sigma$  je  $5,67 \times 10^{-8} \left( \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4} \right)$ . Emisivnost je veća za tamne površine nego za svjetle. Dok tijelo na apsolutnoj temperaturi  $T$  zrači, njegova okolina pri temperaturi  $T_0$  također zrači. Ako je tijelo u toplinskoj ravnoteži s okolinom, tada je  $T = T_0$  te brzina zračenja i apsorpcije mora biti jednaka. da bi ovo vrijedilo potrebno je definirati brzinu apsorpcije koja je dana izrazom

$$H = A\epsilon\sigma T_0^4. \quad (1.7)$$

Zračenje površine tijela  $H_P$  na temperaturi  $T$  u odnosu na temperaturu okoline  $T_0$  dano je sljedećim izrazom:

$$H_P = A\epsilon\sigma T^4 - A\epsilon\sigma T_0^4 = A\epsilon\sigma(T^4 - T_0^4). \quad (1.8)$$

Uočavamo da u relaciji (1.8) toplinska struja poprima pozitivnu vrijednost jer toplinsko zračenje izlazi iz tijela. Prepoznamo da kod kondukcije i radijacije toplinska struja ovisi o temperaturnoj razlici dvaju tijela. U konačnici zaključujemo da ukupni prijenos topline unutar posude ovisi o toplinu prenesenoj kondukcijom, ali i radijacijom, te stoga konačan izraz za prenesenu toplinu na tijelo unutar posude glasi:

$$Q_{in} = kA \left( \frac{T_H - T_0}{d} \right) t + A\epsilon\sigma(T^4 - T_0^4)t. \quad (1.9)$$

### Fazni prijelaz

Pojam faza koristimo za opisivanje specifičnog stanja materije, kao što je kruta tvar, tekućina ili plin. Na primjer: molekula  $H_2O$  postoji u krutoj fazi kao led, u tekućoj fazi kao voda, a u plinovitoj fazi kao vodena para. Prijelaz iz jedne faze u drugu naziva se fazna promjena

ili fazni prijelaz. Za bilo koji tlak i pri točno određenoj temperaturi dolazi do faznog prijelaza, koji je popraćen apsorpcijom ili emisijom topline te promjenom gustoće. Najpoznatiji primjer promjene faze je taljenje leda. Kad ledu dovedemo toplinu na 0 stupnjeva Celzija i pri normalnom atmosferskom tlaku od 1013 hPa, temperatura leda se ne povećava. Toplinu dovodimo tako da sustav bude konstantno u stanju stalne temperature. Dovodjenjem topline sustavu postizemo razbijanje kristalne rešetke te dolazi do promjene faze iz krute u tekuću. Kad se kristalna rešetka u potpunosti razbije, molekule leda postaju pokretljivije, imaju veću brzinu te samim time i veću kinetičku energiju, a kako kinetička energija ovisi o broju čestica  $N$  i temperaturi  $T$  tada će se rastaljenom ledu, odnosno vodi povećati temperatura. Toplina koja je potrebna da se led u potpunosti rastali jednaka je  $Q = mL_f$ , pri čemu je  $L_f$  latentna toplina taljenja. Na analogan bismo način objasnili i fazni prijelaz između tekućih i plinovitih faza. Time dobivamo izraz  $Q = \pm mL$  za prijenos topline u faznoj promjeni. Pozitivan predznak uzimamo kada toplinu dovodimo u sustav, a negativan predznak kada toplinu odvodimo iz sustava. Fazni prijelazi između krutih i tekućih te tekućih i plinovitih faza su reverzibilni.

## 1.2 Leidenfrost efekt

### Općenito o Leidenfrost efektu

Ako želimo prokuhati vodu, tad ju stavimo u posudu koju zagrijavamo odozdo plamenom ili nekim električnim izvorom topline. Kako se voda zagrijava, molekule zraka izlaze iz vode skupljajući se kao sitni mjehurići u pukotinama duž stjenke posude. S vremenom se mjehurići zraka postupno napuhuju te počinju se istiskati iz pukotina uzdižući se na gornju površinu vode. Voda koja je izravno izložena atmosferi kipi na tzv. temperaturi vrenja, koja je pri normalnom atmosferskom tlaku jednaka 100 stupnjeva Celzija. Kako voda koja se nalazi na dnu posude nije izravno izložena atmosferi ostaje i dalje u tekućem stanju i kad se postigne temperatura nešto veća od temperature vrenja. Tijekom tog procesa voda se neprestano miješa konvekcijom na način da se topla voda uzdiže, a hladnija spušta. Ako se temperatura posude povećava, povećava se i brzina kojom se prenosi energija, odnosno ukupna energija vode. Brzina prijenosa energije se povećava sve dok ključanje vode ne uđe u novu fazu, nazvanu prijelazni režim. U prijelaznom režimu mjehurići pare postaju veoma obilni te se počinju stapati jedan s drugim te je samim time veći dio dna posude prekriven slojem pare. Budući da vodena para slabije provodi energiju nego tekuća voda, prijenos energije u vodenoj pari se smanjuje. Zaključujemo da što je posuda toplija to je manje izravan kontakt s vodom te je prijenos energije lošiji. Kad bismo i dalje povećavali temperaturu posude, cijela površina dna posude bila bi prekrivena parom. U tom slučaju se energija polako prenosi u tekućinu iznad pare radijacijom i kondukcijom. Ovu fazu nazivamo vrenjem tankog sloja pare ili ćemo ju kasnije nazivati vrenjem filma. Prvi ta-

kav eksperiment u kojem se promatrala kapljica vrenja vode izveo je Hermann Boerhaave 1732. godine, ali u njegovo vrijeme eksperimentu se nije pridavao veliki značaj te se gotovo zanemario, sve dok 1756. godine, kad je Johann Gottlob Leidenfrost objavio djelo *A tract about some qualities of common water* ili u prijevodu *Rasprava o pojedinim kvalitetama obične vode* u kojem je detaljno istražio, opisao i objasnio eksperiment. Budući da Leidenfrostovo djelo nije bilo prevedeno s latinskog sve do 1965. godine, ono nije bilo zanimljivo širokoj znanstvenoj javnosti. Njegovo ime se povezuje s pojavom Leidenfrostovog efekta, kojeg je istraživao u svom eksperimentu te s vrijednosti temperature u kojoj kapljici vode treba najviše vremena da ispari te se ta vrijednost naziva Leidenfrostovom točkom. Kad je temperatura posude niža od Leidenfrostove točke kapljica vode se raširi po cijeloj posudi te brzo odvođi energiju iz posude, što rezultira potpunim isparavanjem kapljice vode u roku od nekoliko sekundi. Kad je temperatura posude jednaka ili viša od Leidenfrostove točke, tada donji sloj kapljice koja se nalazi na ploči gotovo odmah isparava. Tlak plina iz sloja pare sprječava da ostatak kapi dotakne ploču. Donji sloj kapljice,



Slika 1.2: Uvećan prikaz Leidenfrostovog efekta na kapljici vode.

odnosno vodene pare se stalno nadopunjava, zbog konstantnog isparavanja dodatnog dijela donje površine kapljice vode, koja nastaje uslijed energije koja se zrači i provodi kroz posudu te je tako potrebno puno više vremena da kapljica u potpunosti ispari nego kada je u direktnom doticaju s posudom. Kad promatramo veću kap za vrijeme Leidenfrostova efekta uočavamo da se ona gotovo i ne giba. Kako kap postaje s vremenom sve manja, njezina pokretljivost je veća tako da se kap kotrlja prema hladnijem dijelu zagrijane površine, a to upućuje da se kretanje kapi tad može kontrolirati.

## Režimi vrenja

### Nuklearno vrenje

Nuklearno vrenje je vrsta vrenja koje se događa kad je površinska temperatura viša od temperature vrelišta tekućine za neki iznos, ali gdje je toplinski tok ispod kritičnog toplinskog toka. Za vodu, kao što je prikazano na donjoj slici, nuklearno vrenje se javlja kad je površinska temperatura viša od temperature vrelišta za između 10 i 30 stupnjeva Celzija. Kritični toplinski tok je maksimalna vrijednost na krivulji između vrenja u jezgri i vrenja u tranziciji, odnosno prijelaznog vrenja. Prijenos topline s površine na tekućinu veći je od prijenosa topline kod sloja pare, filma. U području nuklearnog vrenja mogu se razlikovati dva režima. Prvi režim je kad je temperaturna razlika između četiri i 10 stupnjeva Celzija viša od temperature vrelišta, tad se izolirani mjehurići formiraju u tzv. nukleacijskim mjestima i odvajaju od površine tekućine. Ovo razdvajanje uzrokuje značajno miješanje tekućine u blizini površine, povećavajući znatno koeficijent prijenosa topline i toplinski tok. U tom slučaju najveći dio prijenosa topline je izravnim prijenosom s površine na tekućinu u pokretu na površini, a ne kroz mjehuriće pare koji izlaze s površine. Drugi režim može se uočiti kad je temperaturna razlika između 10 i 30 stupnjeva Celzija viša od temperature vrelišta. Tada nukleacijska mjesta postaju sve više aktivna, dok povećano stvaranja mjehurića uzrokuje interferenciju mjehurića. Interferencija između gusto naseljenih mjehurića inhibira kretanje tekućine u blizini površine. Na slici se to vidi kao promjena smjera gradijenta krivulje u krivulji vrenja, točka infleksije, odnosno točka B na grafu krivulje. Nakon ove točke koeficijent prijenosa topline počinje se smanjivati kako se temperatura površine dodatno povećava, iako product koeficijenta prijenosa topline i temperaturne razlike, odnosno toplinski tok još uvijek raste. Kad se relativni porast temperaturne razlike uravnoteži s relativnim smanjenjem koeficijenta prijenosa topline, postiže se maksimalni toplinski tok, što možemo uočiti kao ekstrem na grafu. Takav toplinski tok nazivamo kritičnim toplinskim tokom. U ovom trenutku u maksimumu se stvara značajna količina pare što otežava tekućini da primi toplinu s površine, jer nema konstantnog dodira s njom. To uzrokuje smanjenje toplinskog toka nakon ove točke.

Nuklearno vrenje možemo definirati kao process stvaranja mjehurića pare u tekućini u mikrošuplinama uz zid ako je temperatura zida na površini prijenosa topline iznad temperature vrelišta, dok je većina tekućine pothlađena. Mjehurići rastu sve dok ne dosegnu kritičnu veličinu te se u tom trenutku odvajaju od zida i prenose u glavni tok tekućine. Tamo mjehurići kolabiraju jer temperatura fluida nije tako visoka kao na površini, gdje su i mjehurići nastali. Ovo urušavanje je također odgovorno za specifičan zvuk vode tijekom zagrijavanja, ali prije temperature na kojoj je postignuto vrenje. Prijenos topline i prijenos mase tijekom vrenja ima značajan utjecaj na brzinu prijenosa topline. Ovaj proces prijenosa topline pomaže brzo i učinkovito odnijeti energiju stvorenu na površini za pri-

jenos topline i stoga je ponekad i poželjna, na primjer u nuklearnim elektranama, gdje se tekućina koristi kao rashladno sredstvo.

### **Prijelazno vrenje**

Ako je toplinski tok sustava viši od kritičnog toplinskog toka, rasuti fluid može prokuhati ili u nekim slučajevima, područja tekućeg fluida mogu prokuhati. Tako se stvaraju veliki mjehurići, koji ponekad blokiraju prolaz tekućine. To rezultira odstupanjem od nuklearnog vrenja u kojem mjehurići pare više ne odlaze od čvrste površine kanala. Mjehurići dominiraju kanalom ili površinom, a toplinski tok se dramatično smanjuje, dok para suštinski izolira tekućinu od vruće površine, što je prikazano i na slici. Tijekom ovakvog vrenja površinska temperatura mora stoga znatno porasti iznad temperature tekućeg materijala, kako bi se održao visoki toplinski tok. Ovaj tip vrenja je još poznat kao prijelazno vrenje, nestabilno vrenje sloja pare, tj. filma, odnosno djelomično vrenje filma za ključanje vode, kao što je prikazano na grafu. Prijelazno vrenje nastaje kada je temperaturna razlika između površine i vrele vode između 30 i 120 stupnjeva Celzijeva iznad temperature vrelišta, tj. zasićenja. To odgovara visokom maksimumu i niskom minimumu na krivulji vrenja. Najniža točka između prijelaza i vrenja filma je Leidenfrostova točka, prikazana na grafu.

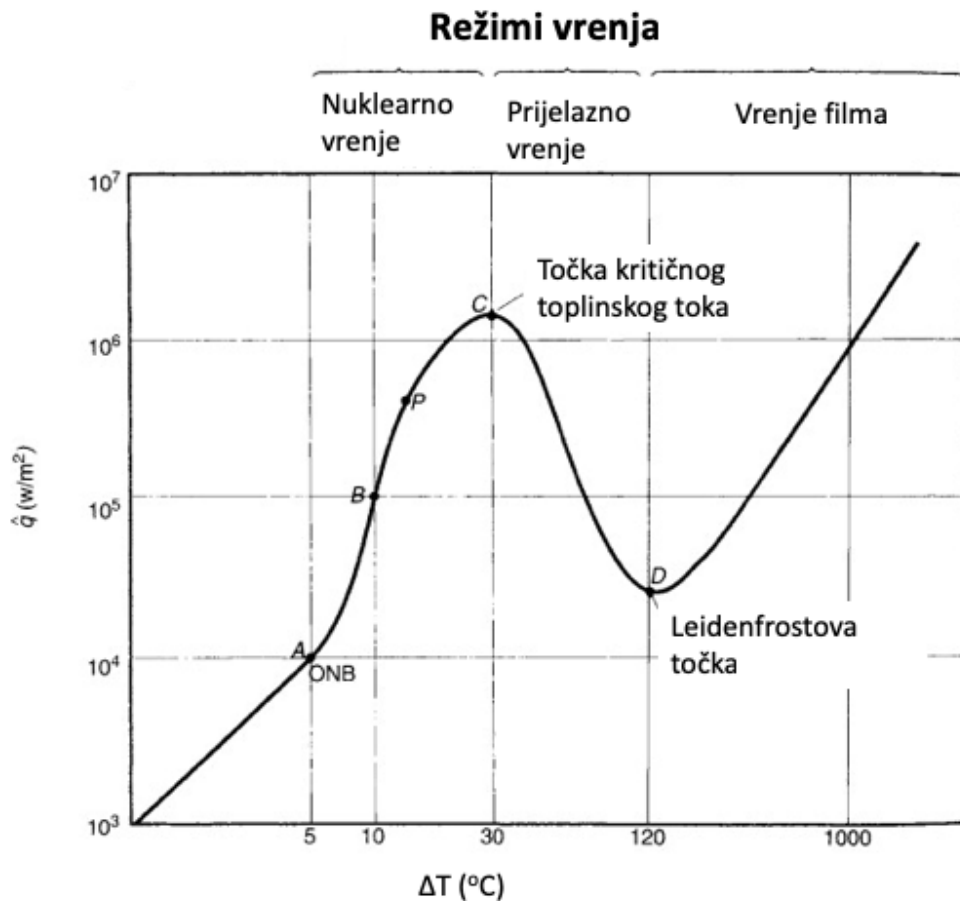
Tijekom prijelaznog vrenja vode stvaranje mjehurića je tako brzo da se na površini vode počinje stvarati parni film ili pokrivač. Međutim, u bilo kojoj točki na površini uvjeti mogu oscilirati između filma i nuklearnog vrenja, ali se dio ukupne površine prekrivene filmom povećava s porastom temperaturne razlike. Kako je toplinska vodljivost pare mnogo manja od toplinske vodljivosti tekućine, koeficijent prijenosa topline i toplinski tok se smanjuju s povećanjem temperaturne razlike.

### **Vrenje filma**

Nuklearni toplinski tok ključanja ne može se neograničeno povećavati. Na nekoj vrijednosti, to zovemo kritični toplinski tok. Proizvedena para može oblikovati izolacijski sloj na površini, što zauzvrat pogoršava koeficijent prijenosa topline. To je zbog toga što je veliki dio površine prekriven slojem pare koji djeluje kao toplinska izolacija zbog niske toplinske vodljivosti pare u odnosu na toplinsku vodljivost tekućine. Odmah nakon dostizanja kritičnog toplinskog toka ključanje postaje nestabilno i nastaje prijelazno vrenje. Prijelaz iz nuklearnog vrenja u vrenje filma poznat je kao "kriza ključanja", budući da se iznad točke kritičnog toplinskog toka smanjuje koeficijent prijenosa topline. Daljnje povećanje toplinskog toka uzrokuje da parni sloj potpuno prekrije površinu. Time se značajno smanjuje koeficijent konvekcije, budući da parni sloj ima znatno manju sposobnost prijenosa topline. Rezultat je višak temperature do vrlo visoke vrijednosti. Iznad Leidenfrostove točke, kontinuirani parni film pokriva površinu i nema kontakta između tekućine i grijane

površine. U ovoj situaciji prijenos topline do pare je modelom zračenja i provođenja. Do vrenja filma dolazi kada padne pritisak sustava ili se protok smanji. U tom slučaju mjehurići ne mogu tako brzo izaći iz površine za prijenos topline. Isto tako, ako se temperatura površine za prijenos topline poveća stvara se sve više mjehurića. Kako se temperatura nastavlja povećavati stvara se sve više mjehurića nego što ih se može učinkovito odvesti. Mjehurići rastu i grupiraju se, pokrivajući male površine površine za prijenos topline filmom pare. Taj proces je poznat još kao i parcijano vrenje filma.

Leidenfrostova točka, koja odgovara minimalnom protoku, od praktičnog je značaja jer predstavlja donju granicu toplinskog toka u režimu vrenja filma. Ako toplinski tok padne ispod ovog minimuma, film će se urušiti, uzrokujući da se površina ohladi i da se ponovno zagrije u ključanju. Stoga se u ovom trenutku događa povratak na ključanje u nukleaciji.



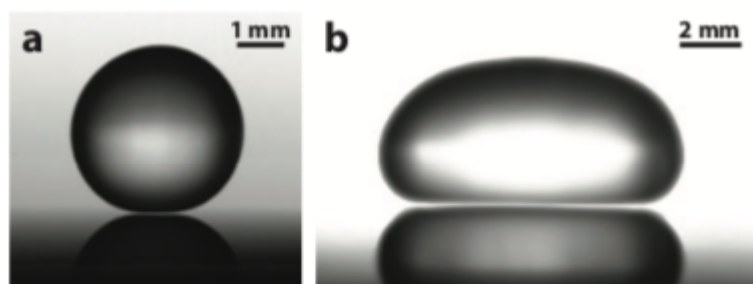
Slika 1.3: Slika prikazuje raspored režima vrenja vode pri atmosferskom tlaku te točku kritičnog toplinskog toka i Leidenfrostovu točku na krivulji toplinskog toka.

## Dinamika Leidenfrostova efekta

Leidenfrostov efekt u isto vrijeme ima dinamički i prolazni učinak, jer se para ubrizgava ispod tekućine i pritišće težinom kapi. Odsudstvo kontakta s tekućom vodom osigurava jedinstvenu pokretljivost za levitirajuću tekućinu koja je u suprotnosti s uobičajenim situacijama u kojima kontaktne linije izazivaju adheziju, prijanjanje i pojačano trenje. Stoga je u Leidenfrostovom efektu prisutno kretanje bez trenja i mogućnost odbijanja nakon udarca.

### Oblik kapljica

Jedina površinska napetost uključena u Leidenfrostov pad je tekućina, odnosno para. To svojstvo podrazumijeva da su male kapi kvazi sfere, dok one veće postaju spljoštene pod gravitacijom. Male kapi se također na neki način sraunjuju s gravitacijom, ali samo blizu



Slika 1.4: Slika a prikazuje kvazi sferu kapljice vode veličine jednog milimetra u promjeru, dok slika b prikazuje spljoštenu sferu veličine dva milimetra u promjeru.

ploče, znači mala deformacija kugle koja dodiruje neformabilnu ploču izaziva zamjetan kontakt.

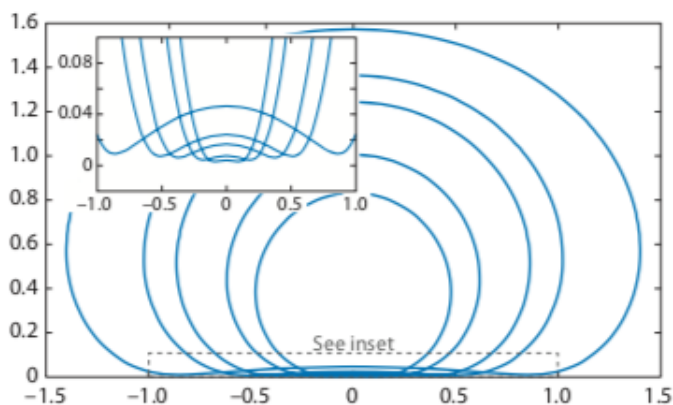
Jedinstvena značajka Leidenforst kapi je da proizvode paru na kojoj lebde te se pritisnu na nju, što može utjecati na levitaciju. Ključno razumjeti karakteristike filma kako bi se predvidio prijenos topline između krutine i tekućine, što ovisi o količini tekućine i brzini njenog isparavanja.

Izostanak kontaktne linije oko levitirajuće kapljice čini ju neprijanjajućim fluidom te generira izvorna dinamična ponašanja, kao što su već ranije spomenuta gibanja bez trenja te odbijanje od krutih tvari.



### Oblik sučelja tekućine i pare ispod njega

Pretpostavlja se da je ovo sučelje ravno za male kapljice, a ako uzimamo kapi većih dimenzija tada konkavna udubljenja postaju sve izraženija i složenija.



Slika 1.5: Slika prikazuje oblik sučelja tekućine i pare ispod njega kod malih kapljica, ali kod onih puno većih.

### Trenje

Postoje dva glavna izvora trenja: viskozno trenje u filmu pare i inercijalno trenje u zraku. Detalji odgovarajućih zakona ovise o obliku tekućine te zbog jednostavnosti razmatramo relativno velike kapi. Općenito, glavna sila koja se opire kretanju levitirajućih kapi je inercija zraka, kao što je slučaj s kapljicom kiše. Isto tako, ako bacimo kapljice tekućeg dušika na pod one će se usporiti dok ih trenje ne zaustavi. Kako se kapljice kreću, to znači da posjeduju određenu kinetičku energiju koja se zatim prenosi vibracijama koje kasnije nestaju zbog viskoznosti tekućine. Ova metoda usporavanja je učinkovita jer uključuje gustoću tekućine, umjesto gustoće pare na ravnoj krutini. Zbog izolacijskih svojstava pare situacija u Leidenfrostovom efektu traje dovoljno dugo da se prouči gibanje ovih gustih vrućih tekućina i da se uspoređi dinamika s dinamikom hladnije kuglice, tj. kuglice bez filma.

### 1.3 Obrnuti Leidenfrost efekt

U svakodnevnom životu Leidenfrostov efekt koristi se za ispitivanje je li tava dovoljno vruća, odnosno ako je tava zagrijana iznad Leidenfrostove točke kap koja se nalazi u tavi početak će se gibati te će se njezino vrijeme isparavanja znatno produljiti u odnosu na temperaturu ispod Leidenfrostove točke. Ostala su se usredotočila na mogućnost stvaranja gibanja na ovaj način, jedan od primjera je sublimiranje suhog leda, koji se često spominje i kao čvrsti analogon Leidenfrostova efekta. Kod takvih istraživanja levitacija je ograničena vremenom potrebnim da predmet levitacije ispari. Alternativno istraživanje je obrnuti Leidenfrostov efekt u kojem se kapljica tekućine stavi na površinu kupelji kriogene tekućine s niskim vrelištem, npr. na tekući dušik. U tom slučaju, kapljica uzrokuje isparavanje supstrata, održavajući konstantnu vlastitu masu tijekom levitacije. Trajanje obrnutog Leidenfrostovog efekta ograničeno je toplinskom energijom spremljenom unutar kapi. Levitacija se pojavljuje sve dok je kap dovoljno vruća da potakne ključanje tekućeg dušika. Nakon što levitacija prestane, kap dolazi u dodir s kupkom, što obično znači da kap tone ispod površine, budući da je gustoća vode veća od gustoće tekućeg dušika. Ovaj fenomen je ispitan tijekom prijenosa topline između dvije tekućine koje su na različitim temperaturama. Iako je osnovni mehanizam koji stoji iza ove levitacije tekućina-tekućina u osnovi isti kao onaj koji je odgovoran za uobičajeni Leidenfrostov efekt, naše kvantitativno razumijevanje toga ostaje samo djelomično. Prethodna istraživanja usredotočena su na modeliranje trajanja levitacije i njezine ovisnosti te o polumjeru kapi. Međutim, zbog relativne nedostatnosti eksperimentalnih podataka, koji su se u svakom slučaju koncentrirali na jednostavne kapljice tekućine u ograničenom rasponu radijusa, ne možemo u potpunosti razumjeti obrnuti Leidenfrostov efekt. Kako bismo u potpunosti mogli istražiti obrnuti Leidenfrostov efekt, trebali bismo istraživati ovaj fenomen kod otopina na bazi vode različitih gustoća i radijusa kapljica. Tada bismo mogli istražiti uvjete koji omogućuju levitaciju kapljica, kao i samo trajanje obrnutog Leidenfrostovog efekta u svakom od plutajućih i tonućih stanja.

### 1.4 Primjena Leidenfrostova efekta

Učinak Leidenfrostova efekta pojavljuje se u jednoj zanimljivoj demonstraciji, a to je hodanje preko vrućeg ugljena. Iako je površina ugljena poprilično vruća, sadrži jako malo energije, odnosno ako osoba hoda umjerenim tempom, njezini koraci su tako kratki da noga provodi malo energije iz ugljena. Ako bi osoba hodala sporije, to bi značilo da je kontakt između stopala i ugljena duži, a to omogućuje da se energija dovede u podnožje iz unutrašnjosti ugljena te to rezultira pojavom opekotina na stopalima. Ako su stopala prije hodanja mokra ili pak samo oznojena, za vrijeme hodanja preko ugljena dio topline isparava tekućinu na stopalima te tako ostaje manje energije, odnosno topline koja prodire do samih stopala, tj. uočavamo pojavu Leidenfrostovog efekta.

Leidenfrostov efekt možemo objasniti i kod eksperimenta uranjanja ruke u tekuće olovo. Kada bismo uranjali ruku u tekuće olovo bez ikakvog poznavanja fizike, odnosno principa rada Leidenfrostovog efekta, ruka bi nam u trenutku doživjela nevjerojatne opekline jer se tekuće olovo nalazi na temperaturi višoj od 320 stupnjeva Celzija. Da bismo uspješno proveli ovaj eksperiment, jako je bitno da prije uranjanja ruke u tekuće olovo, ruku uronimo u vodu te ju potom istresemo, tako da maknemo kapljice vode s nje, ali će ona i dalje ostati vlažna. Vlažnu ruku potom uranjamo u olovo te toplina iz olova započinje isparavanjem vodenog sloja na vlažnoj ruci te tako gradi sloj pare, koji sprječava da koža dođe izravno u dodir s olovom i na taj način osigurava ruku od opekline. Ruku ne smijemo dugo držati u olovu, jer nastali sloj pare brzo nestane pod utjecajem velike temperature.

Suprotno tekućem olovu i njegovoj ekstremno visokoj temperaturi jest tekući dušik. Tekući dušik nalazi se na temperaturi od -196 stupnjeva Celzija. Razlog zbog kojeg nam se ruke ne smrznju kad bismo na njih direktno izlijemo tekući dušik jest ponovno Leidenfrostov efekt. U ovom slučaju je sobna temperatura puno viša od temperature vrelišta tekućeg dušika, pa kad tekući dušik dodirne površinu ruke, koja je iznad Leidenfrostove točke, sloj pare izolira većinu tekućine od dodira s kožom i na taj način sprječava smrzavanje.

## Poglavlje 2

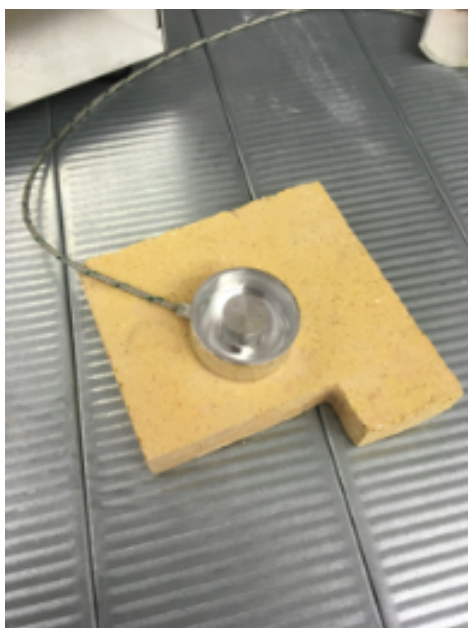
# Metoda mjerenja i eksperimentalni postav

Istraživanje Leidenfrostovog efekta sastojalo se od dva glavna dijela. U prvom dijelu istraživanja određivali smo na koji način okolina djeluje na zagrijanu posudu, odnosno kojom brzinom se posuda hladi, dok smo u drugom dijelu istražili pojavu Leidenfrostovog efekta na kapljici vode, acetona, glicerina i alkohola.

Eksperimentalni postav za prvi dio istraživanja sastoji se od peći, koju smo prethodno zagrijali na 530 stupnjeva Celzija, zatim aluminijske posudice, koju smo u drugom dijelu eksperimenta koristili kao materijal u kojoj smo promatrali Leidenfrostov efekt te multimetar na koji smo spojili termočlanak kako bismo mogli mjeriti temperaturu zagrijane posude. Aluminijsku posudicu smo pomoću zaštitnih rukavica stavili u peć te ju pustili



Slika 2.1: Slika prikazuje izgled peći izvana i iznutra.



Slika 2.2: Slika prikazuje izgled aluminijske posudice koja je stavljena na termočlanak.

neka se zagrije u njoj. Prvo se posudica grijala dvije minute te kada smo ju izvadili iz peći spojili smo ju na termočlanak. Multimetar je očitao da je posuda na 100 stupnjeva Celzija nakon što je bila dvije minute u peći, ali u sam rezultat moramo uračunati i vrijeme koje je bilo potrebno da se uspostavi termalizacija posude s termočlankom. Nadalje, stavili smo posudu ponovno u peć, ali smo ju ovog puta ostavili 10 minuta kako bi se zagrijala. Nakon proteklog vremena pažljivo, uz pomoć zaštitnih rukavica smo ju izvadili iz peći te stavili direktno na termočlanak. Pričekali smo da se uspostavi termalizacija posudice s termočlankom, uzeli smo mobitel kako bismo uz pomoć kamere puno jednostavnije mogli uočiti, odnosno snimiti utjecaj okoline na zagrijanu posudu, snimajući vrijednosti na multimetru. Ovo mjerenje mogli smo provesti i uz pomoć štoperice, olovke i papira, tako da svakih nekoliko sekundi očitamo i zapišemo vrijednost koju nam pokazuje multimetar. Koristeći očitane vrijednosti s multimetra u određenom vremenu odredili smo koliko brzinom okolina hladi zagrijanu posudicu te smo nacrtali graf ovisnosti pada temperature  $T$  u vremenu  $t$ , pri čemu nam pad temperature direktno ovisi o toplini predanoj okolini. Možemo pretpostaviti da predana toplina u vremenu ovisi eksponencijalno, odnosno graf je padajuća eksponencijalna krivulja.

Drugi dio istraživanja, u kojem smo određivali pri kojim se temperaturama počinje javljati Leidenfrostov efekt te koliko je tada vremena potrebno jednoj kapljici vode, glicerina, alkohola ili acetona da u potpunosti ispari, proučavali smo na dva načina.

Kod prvog smo koristili peć, koje je bila i dalje zagrijana na 530 stupnjeva Celzijeva te smo u nju stavili kapljicu vode promjera oko jednog milimetra. Uz pomoć štrcaljke smo regulirali da nam sve kapljice budu jednake veličine. Mjerali smo koliko vremena nam je bilo potrebno od vađenja posudice iz peći do stavljanja kapljice te koliko je zapravo bilo vremena potrebno da kapljica u potpunosti nestane. Dobivena mjerenja smo prikazali u tablici.

Za drugi dio istraživanja Leidenfrostovog efekta koristili smo indukcijsko grijalo. Osim



Slika 2.3: Slika prikazuje kapljicu vode koja se nalazi u posudici koja je netom prije izvađena iz peći u kojoj se zagrijava.

indukcijskog grijala i aluminijske posudice koristili smo i multimeter s termočlankom, pomoću kojeg smo odredili pri točno kojoj temperaturi se javlja Leidenfrostov efekt te pri kojoj je on najizraženiji.



Slika 2.4: Slika prikazuje postav eksperimenta za dio istaživanja Leidenfrostovog efekta.

Dok se indukcijsko grijalo polako zagrijavalo konstantno smo provjeravali da li možemo uočiti Leidenfrostov efekt za kapljicu vode, tako da smo do temperature od 230 stupnjeva Celzija provjeravali za otprilike svaki stupanj, a na temperaturama iznad 230 stupnjeva Celzija za svakih 10 stupnjeva Celzija. Vrijeme potrebno da se kapljica vode u potpunosti raspadne mjerili smo uz pomoć štoperice te rezultate prikazali u tablici. Nakon što se kapljica vode više nije raspadala odmah nakon što smo ju stavili u posudicu ili nakon nekog kratkog vremena, zaključili smo da se javlja Leidenfrostov efekt. Izmjerali smo vrijeme raspada kapljice vode pri različitim temperaturama, dok se indukcijsko grijalo zagrijavalo, ali i dok je ono postiglo svoju maksimalnu temperaturu zagrijavanja te smo ga isključili da se hladi. Rezultate mjerenja prikazali smo u tablici.

Osim opažanja Leidenfrostovog efekta kod kapljice vode, željeli smo provjeriti da li se isti efekt događa kod tekućina kao što su glicerina, alkohol i aceton. Samo istraživanje je bilo identično onom sa kapljicom vode, osim što smo kod ovih tekućina provjerili samo pri kojim se to temperaturama javlja Leidenfrostov efekt.

Učinak se može vidjeti kad se kapljice vode u različitim trenucima posipaju na posudicu dok se ona zagrijava. Budući da je u početku temperatura posudice ispod 100 stupnjeva Celzija, kapljica vode se izravna i polako isparava ili ako je temperatura posudice znatno ispod 100 stupnjeva Celzija, voda ostaje tekućina. Kako temperatura posudice raste

iznad 100 stupnjeva Celzija kapljice vode počinju proizvoditi zvuk zviždanja kada dodiruju posudu i te kapljice brzo isparavaju. Kasnije, kad temperatura prijeđe Leidenfrostove točke dolazi do Leidenfrostova efekta. U dodiru s posudom, kapljice vode skupljaju se u male kuglice vode i okreću okolo, trajajući mnogo duže nego kad je temperature posude bila niža. To je zbog toga što se pri temperaturama iznad Leidenfrostove točke donji dio vodene kapljice isparava odmah nakon dodira s vrućom posudom. Nastali plin suspendira ostatak vodene kapljice tik iznad nje, sprječavajući daljni izravni kontakt između tekuće vode i vruće posude. Budući da para ima mnogo lošiju toplinsku provodljivost od metalne posude, daljni prijenos topline izmđu posude i kapljice dramatično se usporava. Ukupni prijenos topline unutar posude, koju zagrijavamo, odvija se kondukcijom, provođenjem topline dvaju tijela koja su u međusobnom kontaktu, ali i radijacijom, provođenjem topline koristeći elektromagnetsko zračenje. Nije lako predvidjeti temperaturu na kojoj se pojavljuje Leidenfrostov efekt, čak i ako volumen kapljice tekućine ostaje isti, Leidenfrostova točka može biti sasvim različita, s kompliciranom ovisnošću o svojstvima površina kao i bilo kakvim nečistoćama u tekućini. Leidenfrostova točka može se također uzeti kao temperatura za koju levitirajuća kapljica traje najduže.



## Poglavlje 3

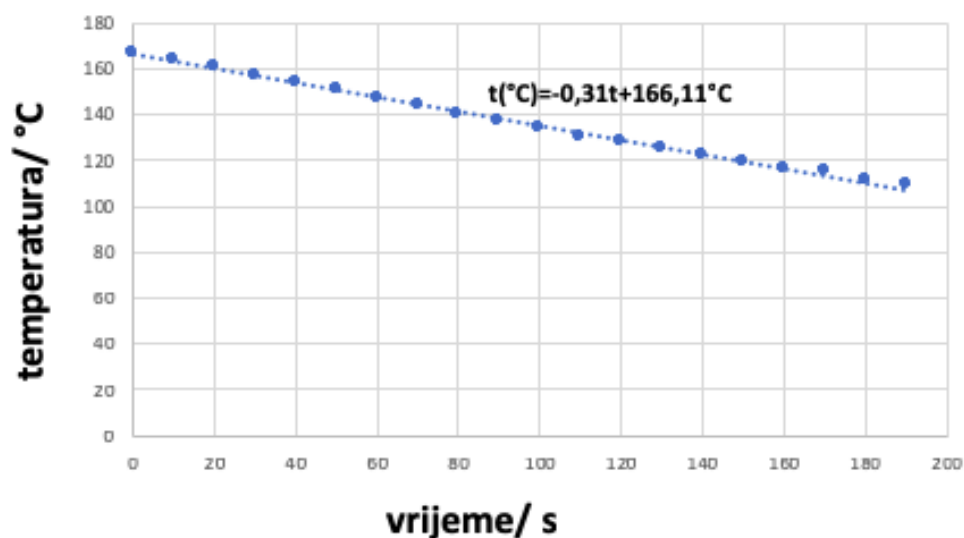
### Obrada rezultata

U prvom dijelu istraživanja željeli smo odrediti na koji način okolina djeluje na zagrijanu posudu, tj. kojim brzinom se zagrijana posuda hladi kada ju izvadimo iz peći. Uz pomoć kamere snimali smo pad temperature na multimetru te dobili sljedeća mjerenja koja su prikazana u tablici 3.1. Za nultu vrijednost temperature posude uzeli smo vrijednost

<i>vrijeme/s</i>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
<i>temperatura/°C</i>	167	164	161	157	154	151	147	144	140	137
<i>vrijeme/s</i>	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
<i>temperatura/°C</i>	134	130	128	125	122	119	116	115	111	109

Tablica 3.1: Tablica prikazuje vrijednosti temperature posude u proteklom vremenu.

temperature pri kojoj je postignuta temperaturna ravnoteža posude s termočlankom, a to je bilo pri 167 stupnjeva Celzija. Koristeći rezultate iz tablice nacrtali smo graf ovisnosti pada temperature u određenom vremenskom intervalu.



Slika 3.1: Graf prikazuje ovisnost temperature posude u vremenu.

Pretpostavili smo da će graf ovisnosti pada temperature u određenom vremenskom intervalu biti eksponencijalna, no primijetili smo da je vremenski niz dobro opisan pravcem, čija jednadžba se nalazi iznad nacrtane krivulje.

Promjena temperature u vremenskom intervalu ovisi o temperaturi okoline. Tijekom hlađenja zagrijana posuda predaje svoju toplinu na dva, već ranije spomenuta, načina, kondukcijom i radijacijom. Kod radijacije struja topline ovisi o temperaturi s četvrtim eksponentom, dok kod kondukcije toplinska struja ovisi linearno o temperaturi. Kako smo točke na grafu mogli dobro povezati pravcem, tada možemo zaključiti da linearni član gubitka topline je izraženiji nego onaj s četvrtom potencijom temperature, odnosno da struja topline u vremenskom intervalu ovisi linearno o promjeni temperature za isti taj interval vremena. Kad bismo željeli odrediti konstante koje su vezane uz radijaciju i kondukciju, odnosno koje se nalaze uz četvrtu potenciju temperature kod radijacije i prvu potenciju temperature kod kondukcije iz jednadžbe (1.9) trebamo paziti koje vrijednosti temperatura bismo tada uzimali. Za kondukciju je to vrlo jednostavno jer temperatura linearno ovisi pa tada uzimamo njezinu proječnu vrijednost, dok kod radijacije ovisi s četvrtom potencijom, pa je tad prosječna vrijednost je gotovo zanemariva u odnosu na onu konačnu vrijednost temperature. Određivanje srednje vrijednosti temperature možemo odrediti grafički tako da nacrtamo graf krivulje snage u ovisnosti o temperaturi te odredimo pri kojoj vrijednosti temperature u određenom intervalu za određenu snagu je ukupna izražena snaga jednaka umnošku te srednje vrijednosti i snage pri toj vrijednosti.

U drugom dijelu istraživanja istraživali smo kako i pri kojim se temperaturama javlja Leidenfrostov efekt kod kapljice vode, ali i glicerina, alkohola i acetona.

Prvi način koji smo koristili za pojavu Leidenfrostovog efekta je zagrijana peć. Aluminijsku posudicu smo prvo zagrijali, zatim ju izvadili izvan peći te mjerili vrijeme koje nam je bilo potrebno dok stavimo kapljicu vode te vrijeme koje je potrebno kapljici vode da u potpunosti nestane. Ovaj način se pokazao neefikasan jer je previše vremena trebalo za stavljanje kapi i termalizaciju termočlanka te smo prešli na drugu metodu. Kod drugog načina istraživanja Leidenfrostovog efekta koristili smo indukcijsko grijalo. Postepeno smo povećavali snagu indukcijskog grijala te smo samim time povećavali i njegovu temperaturu, odnosno temperaturu aluminijske posudice koju smo stavili na grijalo.

Multimetar nam je koristio kako bismo točno odredili kolika je trenutna zagrijanost posudice te na kojoj temperaturi se počinje javljati Leidenfrostov efekt. U počecima smo vršili mjerenja za svakih nekoliko stupnjeva, a kasnije, kada smo uočili pojavu Leidenfrostova efekta, mjerenja smo vršili za svakih 10 stupnjeva Celzija i to na način da smo mjerili dok se grijalo zagrijavalo i dok se ono hladilo. Mjerenja temperature te vrijeme isparavanja kapljice vode prikazali smo u tablici 3.3.

Na temperaturama manjim od 220 stupnjeva Celzija kapljica je isparila odmah te mjerenja za te temperature nismo mogli provesti. Za vrijednosti temperature posude između 220 i 230 stupnjeva Celzija kapljica se nije odmah raspala, ali je veoma brzo isparila pa na tim temperaturama nismo još mogli uočiti Leidenfrostov efekt. U konačnici smo uočili da dok se indukcijsko grijalo zagrijavalo pojava Leidenfrostovog efekta je bila na 235 stupnjeva Celzija te se na toj temperaturi kapljica više nije raspadala, ali dok se indukcijsko grijalo hladilo, Leidenfrostov efekt smo uočili i na temperaturi od 217 stupnjeva Celzija.

Osim za kapljicu vode proučavali smo pojavu Leidenfrostovog efekta za kapljice glicerina, acetona i alkohola. Kod glicerina smo uočili da se Leidenfrostov efekt počinje javljati na 350 stupnjeva Celzija, kod alkohola je to na 135 stupnjeva Celzija, a kod acetona na 122 stupnjeva Celzija.

Koristeći mjerenja iz tablice 3.3 pokušali smo odrediti konstantu  $C$  iz jednadžbe (3.3) te debljinu Leidenfrostova sloja. Za početak smo pretpostavili da su sve kapi na istoj (sobnoj) temperaturi dovedene na aluminijsku posudicu. To znači da za svaku treba jednaka količina energije dok ne ispari, što je zapravo svojstvo samo kapljice, a ne i okoline. Toplina koja je dovedena na kapljicu dolazi od okoline: preko tankog sloja pare od posudice putem kondukcije i od cijele posudice putem radijacije. Nismo promatrali gubitke topline iz kapljice, već samo onu toplinu koju ona prima, uz pretpostavku da je temperatura kapljice uvijek između sobne i 100 stupnjeva Celzija (na temperaturi od 100 stupnjeva Celzija

kapljica ispari), tako da ona sigurno prima neto toplinu od posudice. To znači da vrijedi:

$$\left(\frac{Q_{uk}}{\Delta t}\right) = \left(\frac{kA}{d}\right)(T_O - 100^\circ\text{C}) + BT_O^4, \quad (3.1)$$

$\Delta t$  i  $T_O$  smo uzeli iz tablice te nakon ubacivanja nekoliko mjerenja u jednadžbu (3.1) dolazimo do rezultata da toplinski tok radijacije je 10 redova veličine manji od onog kod kondukcije, stoga zračenje možemo zanemariti te dobivamo sljedeću jednakost:

$$\Delta t = \frac{C}{T_O - 373.15\text{K}} \quad (3.2)$$

pri čemu je u  $C$  sadržan  $Q_{uk}$  i  $\frac{kA}{d}$ , točnije

$$C = \frac{Q_{uk}d}{kA} \quad (3.3)$$

Pretpostavke koje smo uzeli u obzir prije samog izračuna su da je  $\Delta Q_{uk}$  količina topline koja je potrebna da kapljica vode ispari jednaka:

$$\Delta Q_{uk} = mc\Delta t + mL \approx 2500J$$

$d$  je debljina Leidenfrostova sloja, te ćemo nju odrediti,  $k$  je vodljivost pare, čiju smo vrijednost uzeli da je jednaka  $0.045 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$  pri tlaku od jednog bara i temperaturama koje mi koristimo te u konačnici  $A$  kao površina kontakta kapi i podloge što za kap volumena 1 mL iznosi oko  $1.2 \times 10^{-6} \text{m}^2$  ako promatramo kap kao sferu, no ustvari stvarna površina jest puno veća jer se kap spljošti i poprimi oblik diska: Uzet ćemo da je efektivna površina veća za faktor četiri, tako je polumjer veći za faktor dva pa je onda  $A$  jednak  $4.8 \times 10^{-6} \text{m}^2$ . Dobivamo vrijednost za  $C$ :

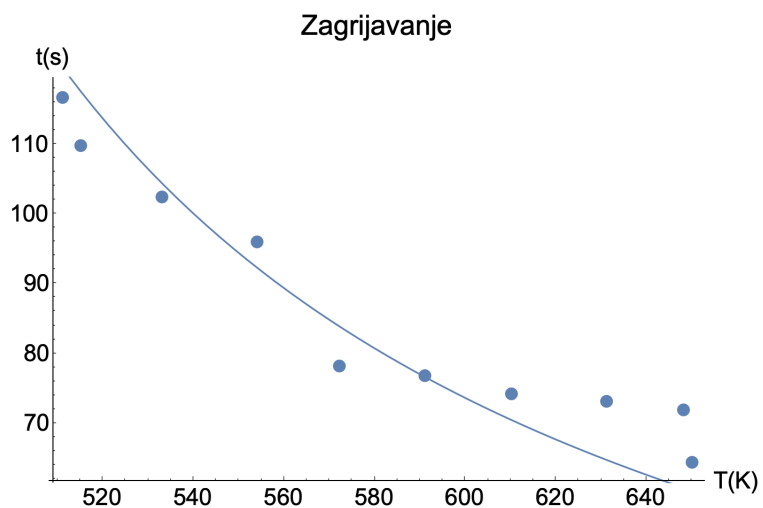
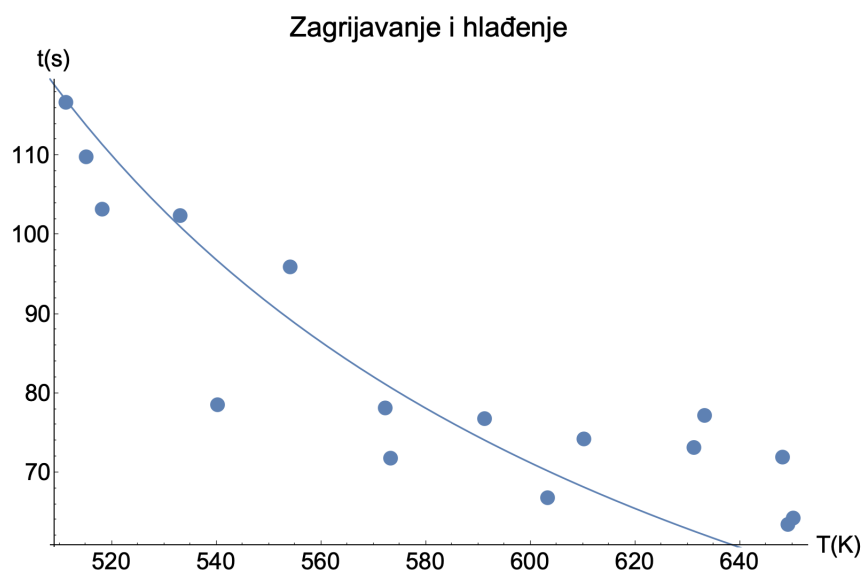
$$C = \frac{2500 \times d}{0.045 \times 4.8 \times 10^{-6}} = 1.16 \times 10^{10}d$$

Nadalje, numerički, pomoću programa *Mathematica*, smo odredili konstantu  $C$  te ona iznosi 16691 Ks, što daje debljinu Leidenfrostova sloja:

$$d = \frac{16691}{1.16 \times 10^{10}} = 1.44 \mu\text{m}$$

Isti postupak ponovili smo za određivanje konstante  $C$ , ali ovog puta koristili smo mjerenja vezana uz zagrijavanje i hlađenje aluminijske posudice te dobili da  $C$  iznosi 16152 Ks. Prilikom hlađenja smo za temperaturu koristili običnu prosječnu temperaturu tijekom hlađenja.

Mjerenja i najbolju aproksimaciju mjerenja, kod zagrijavanja te kod zagrijavanja i hlađenja aluminijske posudice prikazali smo grafički.

Slika 3.2: Graf prikazuje numeričko određivanje konstante  $C$  kod zagrijavanja.Slika 3.3: Graf prikazuje numeričko određivanje konstante  $C$  kod zagrijavanja i hlađenja.

<i>temperatura/°C</i>	<b>Zagrijavamo</b>	220	222	223	224
<i>vrijeme/s</i>		12.05	13.58	16.4	16.44
<i>temperatura/°C</i>		226	228	229	230
<i>vrijeme/s</i>		23.6	18.5	20.86	27.9
<i>temperatura/°C</i>	<b>Pojava Leidenfrostovog Efekta</b>	235	238	242	260
<i>vrijeme/s</i>		102.3	116.71	109.81	102.4
<i>temperatura/°C</i>		281	299	318	337
<i>vrijeme/s</i>		96.0	78.15	76.78	74.19
<i>temperatura/°C</i>		342	358	375	377
<i>vrijeme/s</i>		75.89	73.17	71.92	64.29
<i>temperatura/°C</i>	<b>Hladimo</b>	376	366	360	330
<i>vrijeme/s</i>		63.48	61.62	77.16	66.83
<i>temperatura/°C</i>		300	267	245	217
<i>vrijeme/s</i>		71.82	78.48	103.21	64.73

Tablica 3.2: Tablica prikazuje vrijeme isparavanja kapljice veličine jednog milimetra, odnosno djelovanje Leidenfrostova efekta.

## Poglavlje 4

### Zaključak

Zadatak ovog istraživanja je bio proučiti pojavu Leidenfrostovog efekta na kapljici vode. Prije samog istraživanja nismo bili sigurno hoćemo li uopće uočiti sam efekt i pri kojoj će se temperaturi pojaviti. Znali smo da to uvelike ovisi o zagrijanosti posude koju koristimo, o veličini kapljice vode, ali i o samoj čistoći vode koju koristimo u istraživanju. Leidenfrostov efekt kod kapljice vode uočili smo na nekih 230 stupnjeva Celzija, prilikom zagrijavanja posude, što je veoma zadovoljavajuće, jer smo u u teorijskom dijelu objasnili da se točka Leidenfrost postiže na temperature većoj od 120 stupnjeva Celzija od temperature vrelišta vode, koja je jednaka 100 stupnjeva Celzija. Nakon konstantnog zagrijavanja uočili smo da se trajanje Leidenfrostova efekta smanjuje, tj. Efekt je najduže trajao na temperaturi od 238 stupnjeva Celzija. Nadalje, dok se posudica hladila, također smo provjeravali pojavu Leidenfrostova efekta te koja će to biti najniža temperatura, tijekom hlađenja posude, prilikom koje će se sam efekt i dogoditi. Uočili smo i zabilježili da je to bila temperatura od 217 stupnjeva Celzija, dok ispod te temperature Leidenfrostov efekt se nije pojavio, odnosno kapljica vode, prilikom stavljanja u posudu je bila veoma nestabilna i veoma brzo isparila.

Dobivena mjerenja smo iskoristili kako bismo numerički pokušali odrediti konstantu  $C$  iz jednadžbe (3.3) te debljinu Leidenfrostova sloja koristeći vrijednost konstante  $C$ . Vrijednosti konstante  $C$  kod zagrijavanja i hlađenja se razlikuju veoma malo, točnije za tri posto. Time smo potvrdili mjerenja, odnosno dinamiku problema. Na taj način smo uspjeli dokučiti da je naše mjerenje bilo veoma precizno. Prilikom numeričkog određivanja konstante  $C$  izbačene su točke pri kojima se kapljica raspala jer tada ovaj model ne bi mogao funkcionirati. Za sam kraj ovog dijela istraživanja možemo zaključiti da član kondukcije prevladava nad članom radijacije tijekom izmjene topline, tj. tijekom samog Leidenfrostova efekta.

Osim eksperimenta s kapljicom vode i njezinog zagrijavanja na temperature puno veće od temperature vrelišta vode, proveli smo isti eksperiment i s glicerinom, acetonom i alkohom.

lom. Kod glicerina smo uočili da na nekih 190 stupnjeva Celzija postaje manje viskozan, dok tek na 350 stupnjeva Celzija se počinje javljati Leidenfrost efekt. Unatoč tome znamo da je temperatura vrelišta glicerina 290 stupnjeva Celzija. Leidenfrost efekt alkohola javio se na 135 stupnjeva Celzija, dok je temperatura njegovog vrelišta jednaka 64,5 stupnjeva Celzija, a kod acetona efekt se pojavio na 122 stupnjeva Celzija, a temperatura vrelišta acetona je 56 stupnjeva Celzija.



# Bibliografija

- [1] M. Adda-Bedia, S. Kumar, F. Lechenault, S. Moulinet, M. Schillaci, D. Vella, *Inverse Leidenfrost effect: Levitating drops on liquid nitrogen*, *Langmuir*, 32 (2016), 4179-4188
- [2] D. Quéré, *Leidenfrost Dynamics*, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 45 (2013), 197-215
- [3] Young, D. Hugh and Freedman, A. Roger and Sandin, TR and Ford, A. Lewis, *University physics*, Addison-Wesley Reading, MA, 9 (1996)
- [4] J. Walker, *Boiling and the Leidenfrost effect*, *Fundamentals of physics*, (2010), E10–1
- [5] B. Yirka, *Leidenfrost effect drops found to be self-propelled*, <https://phys.org/news/2018-09-leidenfrost-effect-self-propelled.html>, 2018
- [6] *Boiling*, <https://en.wikipedia.org/wiki/Boiling>, 2019
- [7] *Film Boiling*, <https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/heat-transfer/boiling-and-condensation/boiling-boiling-characteristics/film-boiling/>, 2016
- [8] *Leidenfrost effect*, <https://en.wikipedia.org/wiki/Leidenfrost-effect>, 2019
- [9] *Nucleate boiling*, <https://en.wikipedia.org/wiki/Nucleate-boiling>, 2019

# Sažetak

Leidenfrostov efekt je fizički fenomen u kojem tekućina, blizu površine koja je znatno toplija od točke vrelišta tekućine, proizvodi sloj izolirajuće pare koja sprječava brzo isparavanje tekućine. Zbog te "odbojne sile" kapljica lebdi nad površinom, umjesto da vrši fizički kontakt s vrućom površinom. Ova levitacija uglavnom ima dvije posljedice. Prvo, parni sloj koji sprječava dodir između tekućine i grijane površine osigurava viši stupanj toplinske izolacije, što tim fluidima produžuje vijek trajanja. Drugo, trenje između kapljice i grijane površine uopće ne postoji pa to kapi daje ekstremnu pokretljivost.

U ovom diplomskom radu istraživali smo pojavu Leidenfrostova efekta kod kapljice vode, glicerina, alkohola i acetona. Leidenfrostov efekt kod kapljice vode uočili smo na temperaturi iznad 217 stupnjeva Celzijeva te smo uz pomoć preostalih mjerenja numerički odredili debljinu sloja izolirajuće pare kapljice vode te ona iznosi  $1,44\mu\text{m}$ .

Leidenfrostov efekt smo također uočili i kod glicerina, alkohola i acetona te smo zaključili da se efekt javio na temperaturi barem za 60 stupnjeva Celzijeva većoj od temperature vrelišta tekućina, dok su na nižim temperaturama kapljice bile veoma nestabilne te su brzo isparile.

# Summary

The Leidenfrost effect is a physical phenomenon in which a liquid, near a surface much warmer than the boiling point of a liquid, produces a layer of insulating vapor that prevents the liquid from evaporating rapidly. Because of this "repulsive force", the droplet floats above the surface, instead of making physical contact with the hot surface. This levitation generally has two consequences. First, a vapor layer that prevents contact between the liquid and the heated surface provides a higher degree of thermal insulation, which extends the life of the fluids. Secondly, the friction between the droplet and the heated surface does not exist at all and this gives the droplet extreme mobility.

In this thesis, we have researched an appearance of the Leidenfrost effect in water droplets, glycerin, alcohol, and acetone. The Leidenfrost effect on the water droplet was observed at a temperature above 217 degrees Celsius, and with the help of the remaining measurements we numerically determined the thickness of the insulating vapor layer of the water droplet and it was  $1,44\mu\text{m}$ .

We also observed the Leidenfrost effect in glycerin, alcohol and acetone, and concluded that the effect occurred at at least 60 degrees Celsius above the boiling point of liquids, while at lower temperatures the droplets were very unstable and evaporated rapidly.

# Životopis

Ja, Valentino Ovčariček rođen sam 5. studenog 1995. godine u Zagrebu. Osnovnu školu završio sam u Krapinskim Toplicama. U razdoblju od 2010. do 2014. godine pohađao sam matematičku gimnaziju u Zaboku. Za vrijeme srednjoškolskog obrazovanja sudjelovao sam u projektu *Comenius* te u Crvenom križu. Nakon završene gimnazije upisao sam Prirodoslovno matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Matematički odsjek, Integrirani nastavnički smjer matematike i fizike. Diplomirao sam u rujnu 2019. godine. Od 2012. godine dajem instrukcije za osnovnu i srednju školu, a od 2014. godine i za fakultete. Od 2014. do 2019. godine redovito sam držao vjeronauk za krizmanike i bio voditelj mladih u župi Presveto Trojstvo u Krapinskim Toplicama. Godine 2018. postao sam član Mense.