Kelvinova kapaljka

Horvat, Martina

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:399691

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-20**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO–MATEMATIČKI FAKULTET
MATEMATIČKI ODSJEK

Martina Horvat

KELVINOVA KAPALJKA

Diplomski rad

Voditelj rada:
doc. dr. sc. Nikola Poljak

Zagreb, veljača, 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. _____

Prvenstveno se zahvaljujem svome mentoru doc. dr. sc. Nikoli Poljaku na mentorstvu i ukazanom povjerenju prilikom pisanja diplomskog rada kao i na pomoći i savjetima prilikom izrade i pisanja diplomskog rada. Hvala Vam što ste mi svojim stručnim savjetima i komentarima pomogli u izradi ovog diplomskog rada te što ste uvijek našli vremena i strpljenja za mene.
Također, zahvaljujem se svim kolegama i prijateljima koji su mi svojim prisustvom uljepšali vrijeme provedeno na fakultetu te mi pomogli na bilo koji način.
I na kraju, hvala mojoj obitelji koja mi je omogućila studiranje, na pruženoj pomoći i podršci za vrijeme studiranja.

Sadržaj

Sadržaj **iv**

Uvod **1**

1 Teorijski uvod **2**
1.1 Povijest i sadašnjost 2
1.2 Princip rada 4
1.3 Proces indukcije 6
1.4 Pretvorba energije 8
1.5 Dielektrična snaga 11
1.5.1 Veza struje kroz dielektrik i napona proboja 12

2 Metoda i materijali **14**
2.1 Izrada eksperimentalnog postava 14
2.2 Metoda određivanja ovisnosti napona o vremenu 19

3 Rezultati i diskusija **23**

4 Zaključak **30**

Bibliografija **31**

Uvod

Fizika je jedna od najfundamentalnijih znanosti. Učenjem i razumijevanjem fizike, ponajviše osnovnih zakona fizike, moguće je objasniti i shvatiti svijet koji naš okružuje. Mnoge prirodne pojave lako se mogu objasniti poznavanjem fundamentalnih zakona fizike. Sigurno smo se svi barem jednom u životu upitali kako nastaje munja te zašto uopće dolazi do nastajanja munje. Odgovor je naime vrlo jednostavan i cijeli koncept nije pretjerano intelektualno zahtjevan. Vrlo vjerna analogija tog prirodnog fenomena je pokus koji je izveo William Thompson, a taj pokus poznat je još pod nazivom Kelvinova vodena kapaljka ili Kelvinova grmljavinska oluja.

Kelvinova kapaljka nije jako poznata ni popularna u našem školstvu. Naime, tijekom cijelog svog dosadašnjeg školovanja, nikad nisam čula za taj pokus. Budući da se radi o jednostavnom, no ne tako poznatom eksperimentalnom postavu, odlučila sam istražiti i pozabaviti se tom tematikom. To je ujedno bila i motivacija za odabir teme za diplomski rad.

U prvom poglavlju ovog diplomskog rada dan je kratki teorijski uvod o razvoju i o pozadini rada Kelvinove kapaljke. U drugom poglavlju opisan je tijek izrade te materijali koji su se koristili u izradi. Također opisana je metoda za određivanje dielektrične snage stakla. Nakon toga, u idućem poglavlju, navedeni su rezultati mjerenja te je provedena diskusija na temelju rezultata.

Poglavlje 1

Teorijski uvod

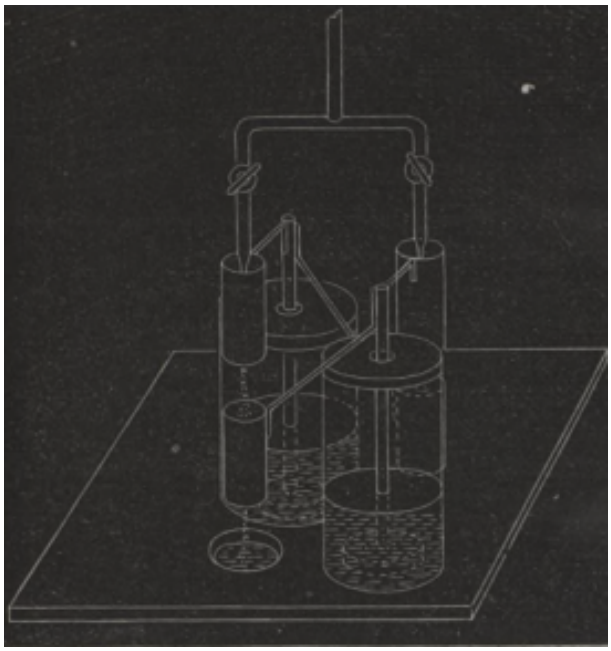
1.1 Povijest i sadašnjost

Dana 19. lipnja 1867. godine, William Thomson objavio je rad *"On a Self-acting Apparatus for multiplying and maintaining Electric Charges, with applications to illustrate the Voltaic Theory"* (vidi [12]). U tom radu je opisao princip rada Kelvinove vodene kapaljke te je nacrtao svoju zamisao tog postava. Nema velike razlike između originalnog postava Kelvinove kapaljke i današnjih verzija postava. Cijeli fizikalni princip rada kapaljke je isti, jedino se mogu pronaći mala odstupanja u korištenoj aparaturi. Umjesto posuda u koje voda kapa originalni postav imao je metalne lijevke koji skupljaju električni naboj, ali propuštaju vodu. Također, Kelvin je koristio Leydenske boce za prikupljanje naboja, dok u današnjim postavima ti rani kondenzatori nisu potrebni jer su posude koje prikupljaju kapljice vode dobro izolirane.

William Thomson, barun Kelvin, punim imenom William Thompson, barun Kelvin od Largsa, rođen je u lipnju 1824. godine [11]. Kasnije u životu, William je postao lord te je uzeo ime Kelvin [8]. Bio je škotski fizičar, inženjer i matematičar. Bio je najistaknutiji u maloj skupini britanskih znanstvenika koji su pridonijeli postavljanju temelja moderne fizike [13]. Već je u mladosti pokazivao odlike matematičkog genija te je bio vrlo napredan u svome učenju. S 22 godine počeo je s mnogim istraživanjima na Sveučilištu u Glasgowu, gdje je postojeću titulu na Sveučilištu imao idućih pedeset godina. Kelvinova istraživanja pokrivala su mnoga područja fizike, a najviše područja kinematike i termodinamike [11]. Svojim radom pridonio je mnogim važnim otkrićima u fizici te ćemo nabrojiti neka od njih. Predložio je apsolutnu skalu za mjerenje temperature, koja se danas naziva Kelvinova skala. Daljnjim istraživanjima, formirao je drugi zakon termodinamike. Doprinio je u matematičkoj analizi elektriciteta i magnetizma, uključujući i osnovnu ideju za elektromagnetsku

teoriju svjetlosti [13]. Također, postavio je teoriju električnih oscilacija, konstruirao je aparat za mjerenje plime i oseke, izvršio je znamenitu procjenu starosti Zemlje (koja je bila pogrešna zbog krive hipoteze) i usavršio je prijenos signala podmorskim kablovina te nautički kompas [14]. Nakon mnogobrojnih otkrića i mnogogodišnjeg podučavanja na Sveučilištu, lord Kelvin otišao je u zasluženu mirovinu. Umro je jedanaest godina nakon umirovljenja, u prosincu 1907. godine. Pokopan je u Westminster Abbeyu i to pored groba Isaaca Newtona [11].

Na slici 1.1a prikazan je crtež postava koji je nacrtao sam lord Kelvin, 1867. godine. Na desnoj slici, odnosno na slici 1.1b, prikazana je vjerodostojna replika Kelvinove kapaljke napravljena prema originalnom crtežu.



(a) Originalni crtež postava iz 1867. godine [12].

(b) Replika Kelvinova postava [5].

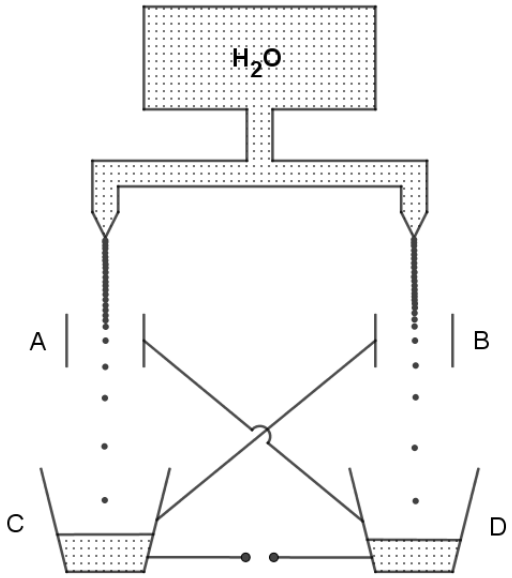
Slika 1.1: Originalni postav Kelvinove kapaljke.

Taj postav nije uopće ništa nepoznato na internetu. Mogli bi reći da je taj eksperiment lako dostupan široj publici te ne bi trebao biti nešto nepoznato. Lako se mogu pronaći mnogi članci koji opisuju rad uređaja s izvršenim mjerenjima pomoću postava. Također, može se pronaći mnogo različitih detaljnih opisa rada uređaja i demonstracijskih videa s raznim verzijama postava Kelvinove kapaljke. Najčešće su to izrade od jeftinijeg i jako pristupačnog materijala i pribora te svatko može taj uređaj napraviti sam kod kuće te se uvjeriti u njegovu učinkovitost. Jedan takav

video, koji se može izdvojiti u moru mnogih drugih sličnih videa, možemo vidjeti na [3]. U raznim verzijama postava umjesto posuda bez dna kroz koje prolaze vodene kapljice, koriste se vodljivi prstenovi. Jedan takav postav možemo vidjeti na [10]. To je jedan od najvećih izrađenih uređaja Kelvinove kapaljke i to u svrhu specijalnog serijala na CapitolTV-u. Taj serijal napravljen je u suradnji s popularnom znanstveno fantastičnom akcijskom dramom *The Hunger Games*. Još jedan postav Kelvinove kapaljke s prstenovima izradila je mlada Abbey Watson kao projekt za znanstveni sajam 2015. godine (vidi [4]). I u našem školstvu, na natjecanjima, moguće je pronaći učeničke projekte koji se bave tim pokusom. Tako su se, školske godine 2009/2010., dvojica učenika natjecala u kategoriji samostalnih eksperimentalnih radova učenika srednjih škola (vidi [2]) s radom naslova *Kelvinova kapaljka*.

1.2 Princip rada

Kelvinova kapaljka je vrsta elektrostatskog generatora. Taj generator radi na principu razdvajanja naboja putem elektrostatske indukcije. Na slici 1.2 nalazi se shematski prikaz najučestalijeg postava Kelvinove kapaljke. Na prvi pogled može izgledati da je Kelvinova kapaljka ništa drugo nego samo dvije cijevi iz kojih ističe voda, dvije posude kroz koje prolazi voda te dvije posude u koje ta voda curi i nakuplja se. Zapravo, takav postav omogućava nakupljanje naboja. Odgovor na pitanje o tome kako dolazi do nakupljanja naboja krije se u samoj vodi.



Slika 1.2: Shematski prikaz postava Kelvinove kapaljke.

Kao što je već spomenuto, Kelvinova kapaljka se sastoji od posuda, koje su na slici 1.2 označene velikim tiskanim slovima. Sve posude u postavu moraju biti od vodljivog materijala. Posude A i B su otvorene s gornje i donje strane, dakle imaju oblik valjka. Posude C i D su otvorene samo odozgo, kako bi voda mogla kapati u njih. Svaka od valjkastih posuda spojena je vodljivom žicom s nasuprotnom posudom na dnu postava. Cijeli postav mora biti izoliran od okoline, kako bi spriječili eventualno međudjelovanje električnog naboja iz okoline i postava Kelvinove kapaljke.

U nekom trenutku pustimo vodu i ona u približno jednakim količinama kapa s jedne i druge strane u posude na dnu postava, prolazeći pritom kroz gornje valjkaste posude. Znamo da je u prirodi gotovo nemoguće pronaći potpuno električki neutralno tijelo, uvijek će postojati višak jedne vrste električnog naboja. Za sve je posude vjerojatnost da će poprimiti ili blago negativan ili blago pozitivan električni naboj ista. Zbog te neravnoteže električnih naboja, kapanjem vode u postavu dolazi do elektrostatskog nabijanja vode, posuda i metalnih kuglica. Pretpostavimo da je u nekom trenutku posuda C blago električni nabijena pozitivnim nabojem. Kako su posude C i B povezane žicom i posuda B će poprimiti blago pozitivan električni naboj. Budući da znamo da je električna sila između raznoimenih naboja privlačna, dolazi do privlačenja između pozitivnih naboja s posude B i negativnog naboja iz kapljica koje prolaze kroz tu posudu. Tako u posudu D dolaze kapljice vode koje su električno negativno nabijene. Time posuda D, ali i posuda A postaju negativno nabijene pa će posuda A uzrokovati više pozitivnog naboja koji kapljicama vode dolazi u posudu C. Time dobijemo kružni proces, koji kako vrijeme prolazi, sve više inducira separaciju naboja u vodi. Dobivamo sve veću količinu električnih naboja na posudama C i D, pri čemu se u svakoj od posuda nakuplja jedna vrsta električnog naboja. Na svaku od tih posuda, vodljivim žicama, spojene su metalne kuglice. Kako se posude C i D sve više električki nabijaju, tako se i metalne kuglice sve više nabijaju. Metalne kuglice se u tom pokusu ponašaju kao ploče kapacitora koje se postepeno pune električnim nabojem. Znamo da za svaki kapacitor postoji najveća moguća količina naboja koju on može primiti. Također, povećanjem količine električnih naboja na pločama kapacitora povećava se i električno polje između ploča. Kada se skupi prevelika količina naboja na metalnim kuglicama dolazi do pražnjenja pa se pojavi iskra. Odnosno, u jednom trenutku električno polje između metalnih kuglica postaje toliko veliko da se molekule zraka između kuglica djelomično ioniziraju, zrak postaje vodič i dolazi do izboja. U tom trenutku dolazi do pražnjenja cijelog sustava te cijeli proces kreće ispočetka i traje sve dok postoji protok vode. Analogno, da smo pretpostavili da je posuda D blago pozitivno električni nabijena, cijeli proces koji se odvija je potpuno analogan. Jedina razlika bi bila da bi posuda C bila negativno, a posuda D pozitivno nabijena. Dakle, prema neravnoteži električnih naboja u početnom trenutku,

određen je električni naboj svake posude u postavu.

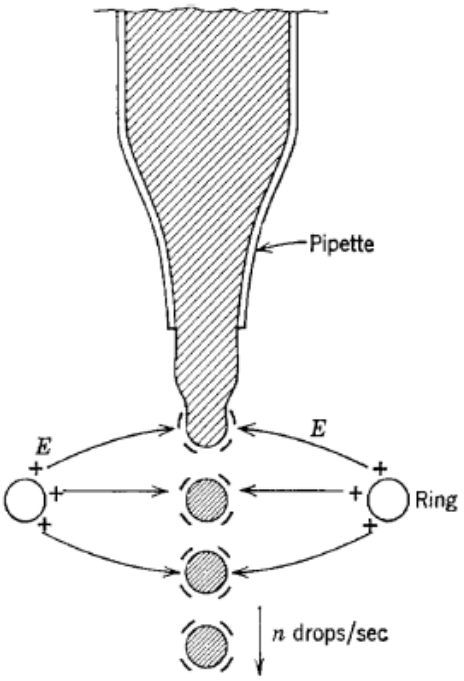
Uređaj koji radi na analognom principu kao i Kelvinova kapaljka, na principu elektrostatske indukcije električnih naboja, je Wimshurstov stroj. Wimshurstov stroj je elektrostatski generator koji koristi postojeći električni naboj za generiranje više naboja putem elektrostatske indukcije.

1.3 Proces indukcije

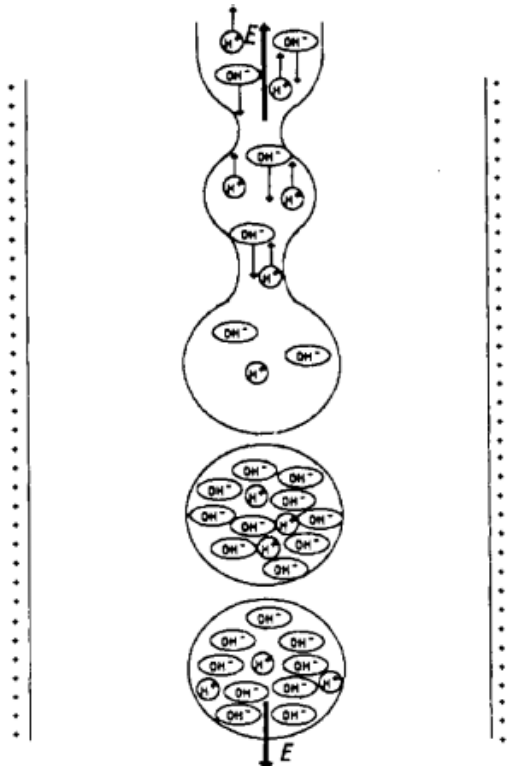
Sada kad smo u grubo objasnili princip rada Kelvinove kapaljke, objasnit ćemo proces indukcije električnih naboja koji je zapravo zaslužan za funkcioniranje cijelog principa. Do indukcije dolazi jer je voda polarna molekula.

Prisjetimo se svojstva električne sile. Električna sila između istoimenih naboja je odbojna, a između raznoimenih naboja je privlačna. To svojstvo električne sile je fundamentalno za objašnjenje električne indukcije naboja kod formiranja kapljica vode. Na slici 1.3 prikazana je shematizacija indukcije električnih naboja pri procesu formiranja kapljica vode. Razmatramo samo jednu stranu postava i to onu stranu kod koje smo pretpostavili da je vodljivi prsten pozitivno električno nabijen. Kako dolazi mlaz vode i počinje se formirati kapljica, više negativnoga naboja će biti na donjem dijelu mlaza zbog električne sile između naboja. Zbog toga će veći dio pozitivnog naboja ostati u gornjem dijelu mlaza vode. U trenutku odvajanja kapljice od vodenog mlaza, kapljica koja se formira imat će više negativnog električnog naboja.

Analogni proces koji se događa u kapljicama možemo opisati pomoću pokusa s balonima. Imamo dva jednako napuhana balona i ovjesimo ih o konac. Vidjet ćemo da će oni ostati kako ih pustimo, to jest neće se međusobno ni privlačiti ni odbijati. Kada oba balona protrljamo vunenom tkaninom i promatramo njihovu interakciju, uočavamo da se baloni udaljavaju jedan od drugoga. Razlog tome je što smo mi trljanjem balona vunenom krpicom, balone naelektrizirali jednom vrstom električnog naboja i znamo da je to negativan električni naboj. Kako su oba balona nabijena istom vrstom naboja, između njih se javlja odbojna električna sila. Nadalje, dovoljno je protrljati samo jedan od balona te ćemo uočiti interakciju između njih. Ako jedan balon naelektriziramo i pustimo ga da slobodno visi u blizini drugog balona, oni će se međusobno privlačiti. U drugom balonu kojeg nismo trljali krpicom dolazi do preorijentacije dipola. Negativni električni naboj se želi što više udaljiti od naelektriziranog balona koji ima isti naboj. Zbog toga u blizini nabijenog balona imamo više pozitivnih električnih naboja pa se između balona javlja privlačna električna sila.



(a) Električno polje vodljivog prstena privlači suprotan naboj pri formiranju kapljice.



(b) Proces indukcije naboja objašnjen pomoću iona.

Slika 1.3: Shematizacija indukcije naboja u procesu formiranja kapi [6].

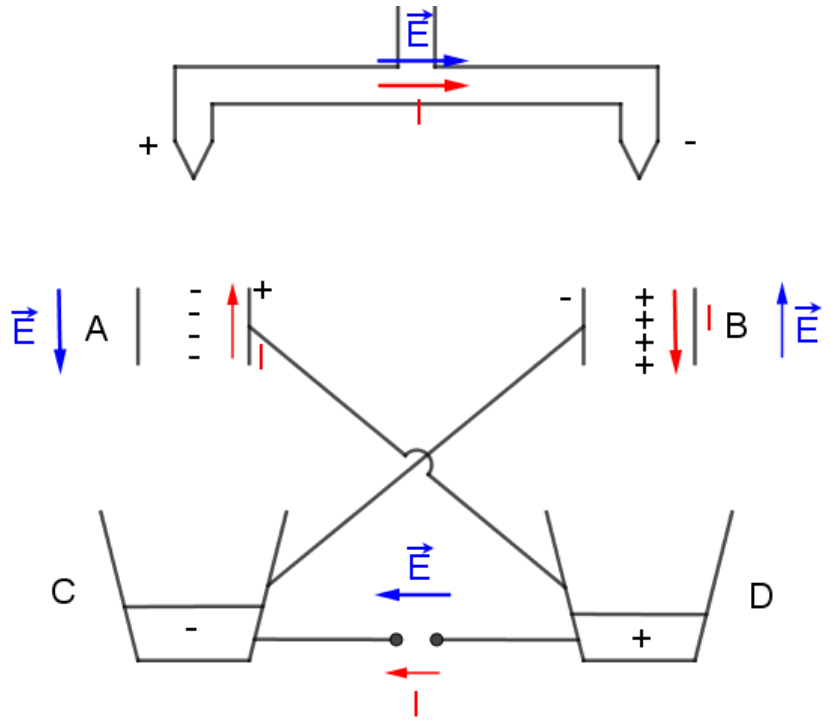
Sada ćemo malo jasnije objasniti proces elektrostatske indukcije pomoću iona vode. Molekula vode primjer je električnog dipola. Molekula vode je kao cjelina električni neutralna, no zbog kemijskih veza unutar molekule dolazi do premještanja naboja. Rezultat toga je blago pozitivniji naboj na vodikovom kraju i blago negativniji naboj na kisikovim krajevima molekule [16]. Molekula vode građena je od OH^- iona i H^+ iona, odnosno od hidroksidnog iona i iona vodika. Kako je vodljivi prsten električni pozitivno nabijen, znači da oko njega postoji električno polje. Zbog električnog polja vodljivog prstena, OH^- ioni vode bit će privučeni u donji dio mlaza gdje se formira kapljica (vidi sliku 1.3a). Promotrimo što se događa i s ostatkom mlaza vode. Kako se raznoimeni naboji odbijaju, pozitivno nabijeni ioni H^+ gurnuti su prema gornjem dijelu mlaza vode. Zbog odbojne i privlačne električne sile, kad dođe do formiranja kapi, odnosno odvajanja kapljice vode od cijelog vodenog mlaza, ukupan električni naboj formirane kapljice je negativan (vidi sliku 1.3b). Kad se kapljica odvoji od vodenog mlaza, preostali vodeni mlaz je blago pozitivno nabijen.

Dakle, ako u postavu Kelvinove kapaljke imamo jedan spremnik iz kojeg dobivamo dva vodena mlaza, što je slučaj u ovom diplomskom radu, onda će taj blago pozitivniji naboj iz jednog vodenog mlaza biti uravnotežen s drugim vodenim mlazom koji je blago negativno električki nabijen. Želimo li osigurati da nemamo nikakve električne neravnoteže u spremniku vode, jednostavno uzemljimo spremnike. Ako pak se u postavu koriste dva zasebna izvora vodenog mlaza, odnosno ako imamo dva odvojena spremnika vode, svaki od spremnika se mora zasebno uzemljiti ili se moraju spojiti električnim vodičem.

1.4 Pretvorba energije

Veliko pitanje koje si možemo postaviti je: "Što u cijelom tom sustavu obavlja rad? Od kuda dolazi energija?". Naizgled, mogli bi zaključiti da iz ničega dobivamo veliku razliku potencijala zbog koje dolazi do nastajanje iskre između metalnih kuglica. Znamo da se u fizici ništa ne dobiva besplatno. Energija je očuvana veličina, ona samo mijenja svoj način pohrane. Jedan od načina prijenosa energije između tijela, koji uključuje djelovanje sile je rad. U ovom slučaju rad obavlja Zemlja nad kapljicom vode koja se odvojila od ostatka mlaza putem gravitacijske sile. To možemo lako uočiti promatrajući električnu struju koja teče u električnom polju. Pa zapitajmo se, kako teče struja? Na slici 1.4 prikazani je shematski prikaz toka električne struje i smjera električnog polja u postavu.

Smjer električne struje dogovorno je smjer gibanja pozitivnih naboja. Ako kapljice negativnog naboja idu prema dolje, smjer struje je prema gore. Ako pak kapljice pozitivnog naboja idu dolje, smjer struje je prema dolje. Također, već smo argumentirali zašto dolazi do lagane neravnoteže u mlazu vode pa je lijeva strana vodenog mlaza blago pozitivno, a desna strana lagano negativno električni nabijena. Struja zbog toga kroz cijev ide s lijeva na desno. Nakon određenog vremena kad pustimo vodu da teče, vidimo iskru, tok struje postoji u donjem dijelu postava. Taj tok nije konstantan već je isprekidan. Što je sa smjerom električnog polja? Smjer električnog polja je od pozitivnog prema negativnom električnom naboju. Kod vodljivih metalnih kuglica, električna struja i električno polje su u istom smjeru kao i u vodi u vodenom spremniku. Koncentrirajmo se na trenutak na posudu A. Negativni ioni, odnosno negativno električki nabijene kapljice ne žele ići u smjeru električne struje, ali gravitacijska sila je ta koja ih vuče prema dolje. Pogledajmo još što se dešava i kod posude B. Pozitivne kapljice, odnosno pozitivni ioni, žele ići u smjeru električnog polja. Ali gravitacijska sila je ta koja im to ne dopušta. Gravitacijska sila je ta koja prisiljava pozitivne ione da se kreću prema dolje. Znači, gravitacijska sila djeluje pro-



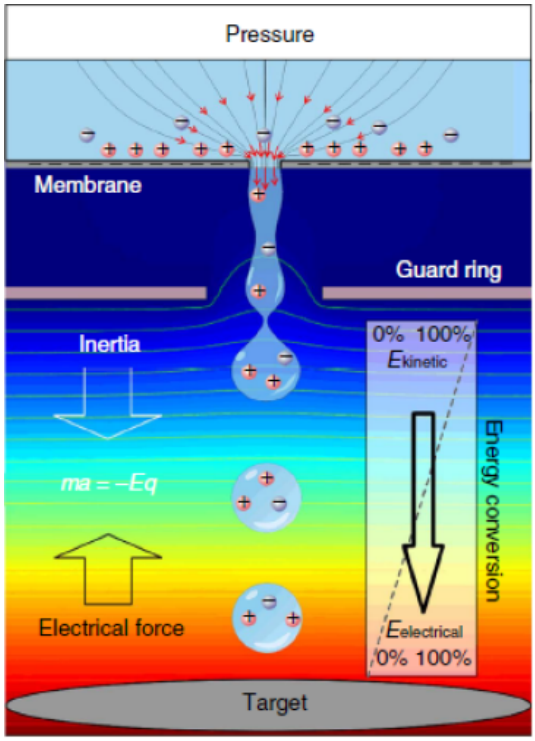
Slika 1.4: Shematski prikaz toka električne struje i smjera električnog polja.

tiv "želje" gibanja naboja. Tako se stvara sve veća i veća razlika potencijala između metalnih kuglica sve dok ta razlika ne dosegne vrijednost dovoljnu za stvaranje iskre.

Vratimo se sada na energetsku sliku, odnosno usredotočimo se na pretvorbu energije. Proces pretvorbe energije prikazan je na slici 1.5 za energetski generator korišten u [15]. Od trenutka kad voda krene curiti iz spremnika nema prijenosa energije u sustav. Kapljica vode, budući da ima masu m i nalazi se na nekoj visini h od tla, posjeduje gravitacijsku potencijalnu energiju. Ta gravitacijska potencijalna energija dana je jednadžbom:

$$E_g = mgh, \tag{1.1}$$

pri čemu je $g = 9.81\ \mathrm{ms}^{-2}$ akceleracija sile teže. Kad vodena kapljica putuje od spremnika prema posudi u kojoj se nakuplja voda, ona prolazi kroz električno polje.



Slika 1.5: Ilustracija pretvorbe energije iz postava korištenog u energetskom generatoru [15].

U postavu Kelvinove kapaljke gravitacija se suprotstavlja električnoj sili te dolazimo do jednadžbe:

$$\Sigma\vec{F} = m\vec{g} - Q\vec{E}, \tag{1.2}$$

pri čemu je Q iznos naboja kapljice i E iznos električnog polja. Rad te sile je:

$$W_{F_{UK}} = (mg - QE)h = mgh - QEh \tag{1.3}$$

i pretvara gravitacijsku potencijalnu energiju u kinetičku energiju i električnu potencijalnu energiju. U slučaju generatora korištenog u [15] dolazimo do jednadžbe:

$$\Sigma\vec{F} = m\vec{a} - Q\vec{E}, \tag{1.4}$$

pri čemu je a iznos ubrzanja kapljice vode.

1.5 Dielektrična snaga

Dielektrik je materijal koji ne provodi električnu struju, odnosno ne vodi električne naboje. Po električnom svojstvu dielektrici spadaju u izolatore. Izolatori su materijali u kojima je gotovo nemoguće izazvati tok struje, zbog toga što su u izolatoru svi negativni električni naboji, odnosno elektroni, jako vezani uz svoj odgovarajući pozitivan naboj. Za razliku od toga, vodiči su materijali u kojima se određen broj elektrona može lako osloboditi i mogu se slobodno gibati pod utjecajem električnog polja. U nekim slučajevima može doći do pojave slobodnih elektrona u nekom izolacijskom materijalu, koji se potom počinje ponašati kao vodič. Iako ne vodi struju, dielektrik je materijal kroz koji prolazi električno polje. Dielektrični materijali mogu biti u plinovitom, tekućem ili čvrstom agregatnom stanju.

Dielektrična snaga materijala je unutarnje svojstvo materijala i neovisno je o konfiguraciji materijala ili elektroda kojima proizvodimo električno polje. Dielektrična snaga kod izolatora odnosi se na iznos maksimalnog električnog polja koje se u materijalu može ostvariti prije nego dođe do promjene izolacijskih svojstava. Također, pojam dielektrične snage se kod dielektričnih materijala odnosi na minimalni iznos električnog polja kod kojeg dolazi do proboja. Taj koncept naziva se napon proboja. Drugim riječima, napon proboja je minimalni napon koji uzrokuje da dio izolatora postane vodič, odnosno minimalna razlika potencijala koja se može primijeniti kroz materijal prije nego provede struju. Veza napona i iznosa homogenog električnog polja dana je jednadžbom:

$$V = Ed, \tag{1.5}$$

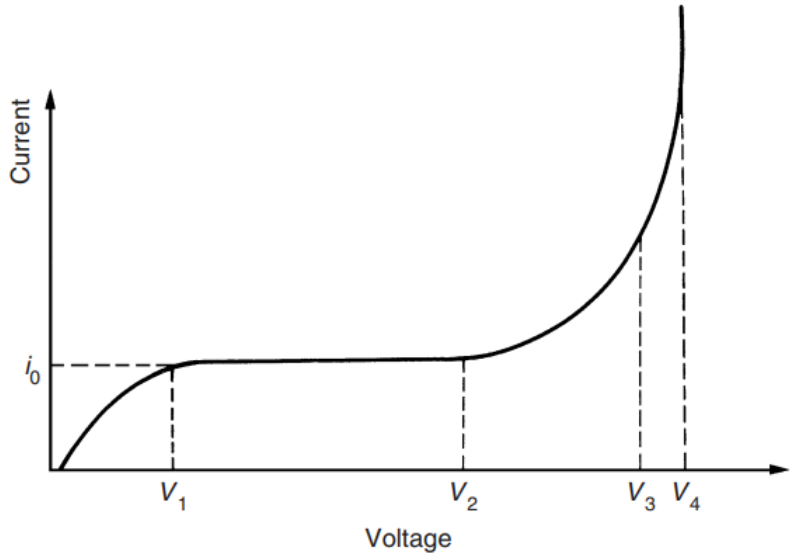
pri čemu je V iznos napona, E iznos homogenog električnog polja i d udaljenost između elektroda. Ako je iznos primijenjenog električnog polja dovoljno velik, slobodni elektroni mogu se ubrzati tako da imaju dovoljnu brzinu da pri sudaru s neutralnim atomima oslobađaju dodatne elektrone. Kada dođe do proboja, stvara se neka vrsta električnog vodljivog puta. Više o tom cijelom procesu može se naći u [9]. Zbog toga dolazi do naglog pražnjenja kroz taj materijal, odnosno dolazi do dielektričnog proboja. Kod materijala u čvrstom agregatnom stanju, proboj može dovesti do oslabljenja ili čak uništenja izolacijskih svojstava. U tablici 1.1 prikazane su vrijednosti dielektrične snage nekih materijala koji se nalaze u plinovitom i krutom agregatnom stanju.

Materijal	Dielektrična snaga (MV/m)
zrak (suhi pri atmosferskom tlaku)	3.0
helij	0.15
visoki vakuum	20-40
prozorsko staklo	9.8-13.8
borosilikatno staklo	20-40
neoprenska guma	15.7-26.7
papir s voskom	40-60
dijamant	2000

Tablica 1.1: Dielektrična snaga nekim plinova i čvrstih materijala [1].

1.5.1 Veza struje kroz dielektrik i napona proboja

Kod plinovitih dielektričnih materijala postoji ovisnost kondukcijske struje o naponu prije nego što dođe do proboja. Tu ovisnost je prvi proučavao John Sealy Townsend. On je promatrao promjenu jakosti struje u plinu, mjerenu između dvije paralelne pločaste elektrode, kao funkciju primijenjenog napona [7]. Na slici 1.6 je prikazana ta ovisnost.



Slika 1.6: Ovisnost struje o naponu kod plinovitih dielektričnih materijala [7].

Možemo uočiti da postoje četiri područja. U prvom području postoji nelinearna veza između iznosa struje i napona. Najprije se iznos struje povećava proporcionalno

s primijenjenim naponom. U tom području postoje slobodni elektroni koji mogu biti ubrzani djelovanjem električnog polja i time stvoriti struju. U drugo područje dolazimo nakon nekog određenog napona u kojem dolazi do zasićenja. Ta struja zasićenja je na grafu prikazana s i_0 i vidimo da je konstantnog iznosa. Daljnjim povećanjem napona dolazi do povećanja iznosa struje iznad struje zasićenja i_0. Napon V_2 odgovara naponu proboja dielektrika. Zadnja dva područja uzrokovana su lavinom iona koje objašnjava Townsendov mehanizam pražnjenja (vidi [7]). Ukratko, to je proces u kojem se slobodni elektroni ubrzavaju pomoću električnog polja, sudarajući se pri tome s molekulama plina i pri sudarima oslobađaju dodatne elektrone. Rezultat toga je višestruka lavina koja uzrokuje električnu provodljivost kroz plin. Ta područja se nazivaju još i područja udarne ionizacije. Da bi došlo do proboja potreban je izvor slobodnih elektrona te dovoljno jako električno polje.

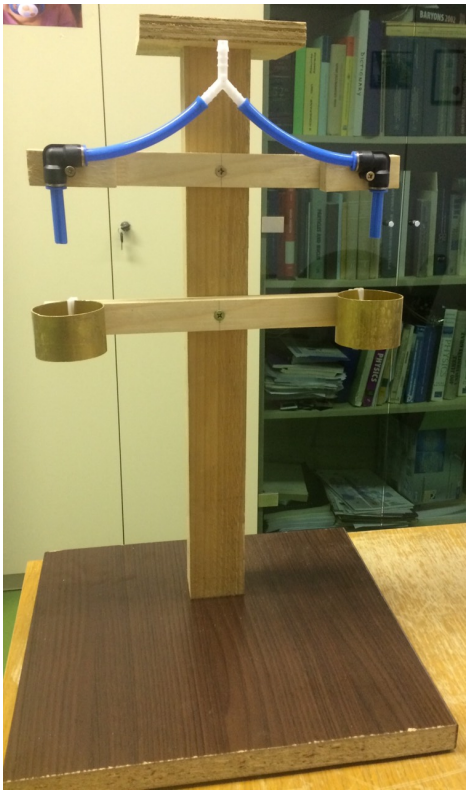
Poglavlje 2

Metoda i materijali

2.1 Izrada eksperimentalnog postava

Za potrebe diplomskog rada izradili smo eksperimentalni postav Kelvinove kapaljke. Najprije smo nabavili sav materijal koji nam je bio potreban za izradu postava. Za izradu postava kupili smo sjedeće stvari: silikonska crijeva, ventil, Y spojnicu, dvije L spojnice, polipropilensku cijev, četiri metalne čaše i plastičnu posudu. Cijena tog materijala je otprilike 300 kuna. Sav preostali materijal koji smo koristili za izradu eksperimentalnog postava našli smo na Fakultetu.

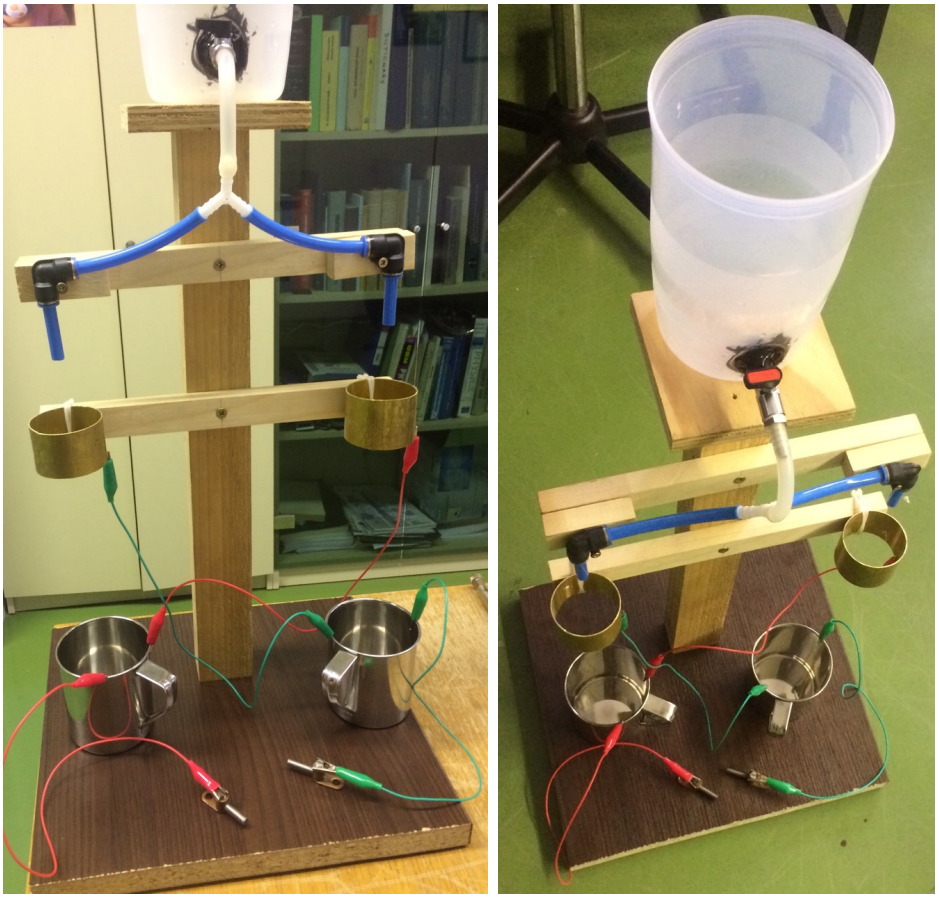
Prvo što smo napravili je postolje. Prvotni plan je bilo postolje u obliku stolića, na kojem bi smjestili vodeni spremnik i valjkaste posude kroz koje bi kapale kapljice vode. Na kraju smo se odlučili za drugačiji tip postolja. Kako bi izradili postolje, otišli smo u radionu na Fakultetu. Postolje smo izradili od drva, pošto je to bio najpristupačniji materijal. Pomoću cirkulara za drvo smo odrezali veličinu i oblik drva koji nam je bio potreban. Postolje Kelvinove kapaljke se sastoji od velike drvene podloge, drvenog stupa, malog drvenog postolja te dvije drvene letvice. Sve drvene dijelove smo spojili vijcima, kako bi cijelo postolje bilo stabilno. Na krajeve gornje letvice smo pričvrstili još dva manja komada drveta, kako bi prilagodili mjesto gdje će se nalaziti krajevi cijevi i time odredili mjesto izlaska vodenog mlaza. Na kraju smo na donju podlogu zalijepili gumene jastučiće da bi cijelo postolje bilo stabilno i izolirano. Na slici 2.1 prikazano je postolje koje smo izradili.



Slika 2.1: Prvo izrađeno postolje eksperimentalnog postava.

Nakon izrade postolja, u radioni smo trebali još izrezati metalnu posudu, kako bi dobili posudu bez gornjeg i donjeg dijela. Zamisao je bila da metalnim čašama odrežemo dno, no u radioni nije bilo alata kojim bi to bilo sigurno izvesti. Alat za rezanje metala koji se nalazi u radioni, nema prikladno postolje za fiksiranje materijala koji se reže te bi trebalo rukom držati čašu, od čega smo naravno odustali zbog sigurnosnih razloga. U međuvremenu smo na Fakultetu uspjeli pronaći veću cijev od mjedi. Od nje smo odrezali dva široka komada cijevi, promjera približno 4 centimetara. Zbog lakšeg izražavanja, te komade ćemo od sad pa nadalje zvati prstenovima. Kako na alatu za rezanje nije bilo najpraktičnijeg dijela za fiksiranje metala koji se reže, bilo je vrlo teško odrezati dva komada metalne cijevi jednake širine. Na postolju, na donje drvene letvice, plastičnim smo vrpcama pričvrstili metalne prstenove i to tako da smo svaki od prstenova pričvrstili s dvije unakrsne plastične vezice. Također, pomoću vijaka smo na gornju letvicu pričvrstili L spojnice u koje dolaze cijevi. Zadnje što smo trebali izraditi je spremnik. U plastičnoj posudi smo pomoću bušilice izbušili otvor malo manjeg promjera od promjera navoja na ventilu. Nakon što smo pričvrstili ventil u posudu, vanjski i unutarnji dio posude oko navoja

smo premazali crnim silikonom kako bi spriječili protok vode kroz taj dio. Trebalo je dva dana da se taj silikon u potpunosti osuši te smo nakon toga dovršili postav. Jedino što je preostalo je staviti cijevi te spojiti žice. Silikonsku cijev smo koristili za spajanje ventila i Y spojnice. Za spajanje Y spojnice i L spojnice koristili smo polipropilensku cijev, koju smo iskoristili i na drugoj strani L cijevi kao cijev iz koje izlazi voda. Metalne posude i prstenove smo unakrsno spojili žicama. Žice smo na metalne dijelove pričvrstili "krokodilkama". Žicama smo spojili i posude te volframove štapiće. U eksperimentu smo koristili volframove štapiće jer kod njih ne dolazi do oksidacije materijala prilikom stvaranja iskre. Tada smo mogli testirati ispravnost eksperimentalnog postava. Prva verzija eksperimentalnog postava može se vidjeti na slici 2.2.

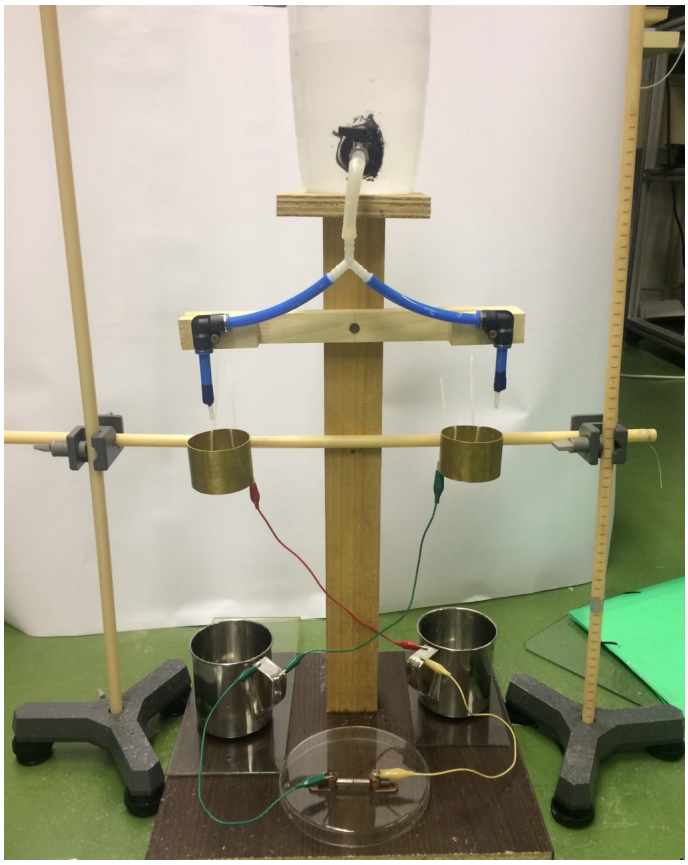


Slika 2.2: Prvi eksperimentalni postav koji smo izradili.

Prva verzija eksperimentalnog postava nije funkcionirala, odnosno nije dolazilo do nakupljanja naboja na metalnim posudama. Glavni problem cijelog postava bila

je nedovoljna izoliranost sustava od okoline. Također, polipropilenska cijev je bila preširoka. Naime, mlaz koji je izlazio nije bio lijep, već se dosta raspršivao i to nije bilo prikladno za stvaranje lijepog niza kapljica. Uočili smo i da eksperiment najbolje radi kada u metalni prsten ulazi mlaz vode, a izlaze formirane kapljice. Odnosno, kad se kapljica formira unutar metalnog prstena.

Nakon što smo uočili probleme u prijašnjem postavu, napravili smo niz promjena na postavu. Eksperimentalni postav nakon promjena nalazi se na slici 2.3.



Slika 2.3: Eksperimentalni postav kojim je provedeno mjerenje.

Promjene koje smo napravili su da smo metalne posude i volframove štapiće stavili na staklenu podlogu. Time smo izolirali sav metal u postavu od drvenog postolja. Drvenu letvicu na koju smo pričvrstili metalne prstenove zamijenili smo plastičnim štapom kojeg smo za potrebe mjerenja stavili na metalne stalke. Kao dodatna izolacija, na metalne čaše smo zalijepili gumene jastučiće te također na metalne prstenove smo zalijepili gumene jastučiće koji su se nalazili na mjestu dodirivanja metalnih

prstenova s plastičnim štapom. Sve žice smo zamijenili kraćim žicama te je trebalo pripaziti da se sve žice nalaze u zraku, da nijednim svojim dijelom ne dodiruju postolje te da se ni međusobno ne dodiruju. Iako sve žice imaju plastični ovoj, ako su došle u kontakt s bio čime osim zraka, dolazilo bi do gubitka naboja. Kako bi prilagodili mlaz vode, u polipropilensku cijev smo stavili užu cijev. Tako smo smanjili promjer otvora kroz koji izlazi mlaz vode i riješili problem raspršivanja vodenog mlaza. Za potrebe mjerenja smo na jednu od metalnih čaša žicom spojili elektroskop. Koristili smo vrlo osjetljiv elektroskop s listićem jer smo uočili da u trenutku kada "skoči" iskra i dolazi do pražnjenja naboja s volframovih štapića, elektroskop se izbije. Lakše je promatrati izbijanja i nabijanja elektroskopa, nego uočiti iskru koja se stvara pri proboju. U eksperimentu smo koristili slanu vodu kako bi pospješili proces ionizacije.

Sada će se navesti dimenzije pojedinih komponenata u postavu kojim smo proveli mjerenja (vidi tablicu 2.1).

	duljina (cm)	širina (cm)	visina (cm)	$2r$ (cm)	V (L)
donje postolje	37	33	2.5		
gornje postolje	13.3	12.7	1.7		
stup	5.7	4.1	54.5		
letvica	31.7	2.7	1.9		
manja letvica	6.8	2.7	1.9		
polipropilenska cijev				0.8	
silikonska cijev				0.6	
plinska cijev				0.2	
metalne čaše			9	8.7	0.45
metalni prsten 1			4	6	
metalni prsten 2			4.3	6	
plastični spremnik			20	11-13.5	1.7

Tablica 2.1: Dimenzije komponenti koje smo koristili u izradi Kelvinove kapaljke.

Već je ranije spomenuto da metalni prstenovi nisu jednake visine, zbog težeg barataja alatom za rezanje metala. Plastični štap na kojem su pričvršćeni metalni prstenovi nalazi se na visini od 33 centimetara iznad postolja. Metalni prstenovi se od kraja cijevi manjeg promjera (plinske cijevi) nalaze na visini od otprilike 2 centimetra. Ta visina nije toliko bitna jer smo mi jačinom mlaza, odnosno koliko smo odvrnuli ventil na spremniku vode, regulirali mjesto nastajanja vodene kapljice. Udaljenost između krajeva metalnih prstenova i početka metalnih čaša je približno 21.5 centimetar.

2.2 Metoda određivanja ovisnosti napona o vremenu

Uz pomoć elektroskopa smo mjerili vrijeme potrebno za 10 proboja, odnosno 10 izbijanja elektroskopa, kad se između volframovih štapića nalazi zrak. Mjerenje je ponovljeno tri puta te je na temelju toga određeno vrijeme potrebno da dođe do proboja u zraku. Također, izmjerili smo vrijeme potrebno da dođe do proboja ako se između volframovih štapića nalazi pokrovno stakalce koje se koristi za prekrivanje preparata kojeg proučavamo mikroskopom. Za mjerenje vremena u tom slučaju naišli smo na problem. Uspjeli smo dva puta izmjeriti vrijeme potrebno za probijanje dielektrične snage pokrovnog stakalca. Jednom je mjereno vrijeme jednog proboja, a drugi put je mjereno vrijeme potrebno za dva proboja. Zbog teško ponovljivog mjerenja i činjenice da smo mjerili vrijeme potrebno za jedan, odnosno dva izboja, a ne kao u slučaju zraka za 10 njih, rezultat koji smo dobili ima značajnu grešku. Nakon izvršenih mjerenja, za računanje dielektričnih snaga materijala koje smo koristili u pokusu, trebali smo odrediti ovisnost napona na čaši o vremenu. Naša je pretpostavka da kako vrijeme prolazi, na metalnim prstenovima se nakuplja sve više i više naboja, a time i u vodi koja curi u metalne čaše, na metalnim čašama te na volframovim štapićima. Kako je količina naboja direktno proporcionalna iznosu električnog polja, povećanjem količine naboja na štapićima povećava se i jakost električnog polja između njih. Zbog povećanje električnog polja, nove kapi koje izlaze iz spremnika nose više naboja. To jest, kako vrijedi da je $I = \dot{Q} \sim E$, a $E \sim Q$, postoji proporcionalnost između $\dot{Q}$ i Q, to jest $\dot{Q} = CQ$. Rješenje ove diferencijalne jednadžbe je $Q = Q_0 e^{ct}$ ako je početna količina naboja Q_0, što je ovdje slučaj. Kako je napon proporcionalan naboju, i napon će pratiti eksponencijalnu ovisnost.

Kako bi odredili kako napon ovisi o vremenu, DSLR fotoaparatom smo snimali nabijanje elektroskopa. To je kamera koja snima 50 sličica ili okvira (zasebnih slika) u sekundi. Taj se pojam kod nas naziva još i okvirna stopa. Na temelju naše snimke, odredili smo kut otklona listića u ovisnosti o vremenu. Pomoću programa VLC media player odabrali smo da nam iz snimke izbaci svaku 10. sličicu. Mi smo mjerili kut za svaku 5. sličicu u tako odabranim sličicama. Izmjerili smo otklon kuta za prvih 13 (od 1. do 61. za svaku 5. sličicu) tako odabranih sličica, jer nakon toga dolazi do zasićenja naboja na elektroskopu i listić na elektroskopu počinje lelujati. Na slici 2.4 prikazan je kut otklona kazaljke za 1. i 61. sličicu u selekciji od 10 sličica po sekundi.

(a) 1. sličica koja prikazuje početni kut otklona listića.

(b) 61. sličica koja prikazuje najveći kut otklona koji smo uzeli u razmatranje.

Slika 2.4: Otklon kazaljke u procesu nabijanja elektroskopa.

Znamo da je kut otklona linearno proporcionalan količini naboja na listiću. Također, količina naboja je proporcionalna iznosu napona. Zaključujemo da je kut otklona listića na elektroskopu proporcionalan iznosu napona između volframovih štapića. Kako je listić na elektroskopu imao početni otklon, u svakom od izmjerenih kutova otklona listića trebali smo oduzeti početni kut otklona. Nakon što smo izmjerili

kutove otklona i oduzeli početni otklon, u programu Wolfram Mathematica nacrtali smo graf ovisnosti o vremenu. Vremenski razmak između sličica odredili smo pomoću informacije za okvirnu stopu kamere koju smo koristili u eksperimentu. Za svaku 5. sličicu, razmak između sličica je 0.5 sekunde. Konačno, konvertiranjem rednog broja sličica u sekunde te kuta otklona u napon, u mogućnosti smo nacrtati graf ovisnosti napona o vremenu. Proporcionalnost između napona i kuta otklona odredili smo iz tablične vrijednosti dielektrične snage zraka i udaljenosti između volframovih štapića. Za dobiveni uzorak u programu Wolfram Mathematica odredili smo linearnu i nelinearnu ovisnost. Iz razmatranja dobivenih rezultata, kako je standardna greška pri linearnoj ovisnosti puno veća, zaključili smo da je ovisnost napona o vremenu uistinu eksponencijalna. Nelinearnu ovisnost modelirali smo funkcijom:

$$V(t) = A(e^{Bt} - 1), \tag{2.1}$$

pri čemu su A i B konstante. Ta funkcija je prikladna jer lako isčitamo da u trenutku $t = 0$, kad nema naboja na volfranovim štapićima i nema otklona na elektroskopu uzrokovanog nabijanjem listića, vrijednost napona je $V = 0$. Regresivnom metodom, odnosno pomoću programa Wolfram Mathematica, odredili smo srednje vrijednosti A i B te njihovu standardnu grešku. Kôd koji smo koristili u navedenom programu prikazan je na slici 2.5.

```
In[22]:= nlm = NonlinearModelFit[%, A * (e^(B*x) - 1), {A, B}, x]
         nlm[{"BestFit", "ParameterTable"}]
```

Slika 2.5: Kôd koji smo koristili u programu Wolfram Mathematica za određivanje parametara.

Zatim smo u istom programu nacrtali graf ovisnosti napona o vremenu s dobivenim podacima te funkcijom odgovarajuće ovisnosti (kôd koji smo koristili nalazi se na slici 2.6).

```
In[24]:=
Show[ListPlot[Data2], Graphics[{PointSize[0.02], Red, Point[{3, 280}]}],
 Plot[{300 * (e^(0.242*x) - 1)}, {x, 0, 12}], AxesOrigin → {0, 0},
 AxesLabel → {"t(s)", "V(V)"}, LabelStyle → Directive[Black, FontSize → 26],
 PlotLabel → Style["Napon kao funkcija vremena", FontSize → 26, Black],
 AxesStyle → Directive[Black, FontSize → 22], ImageSize → Large,
 Ticks → {Automatic, {200, 400, 600, 800, 1000}}]
```

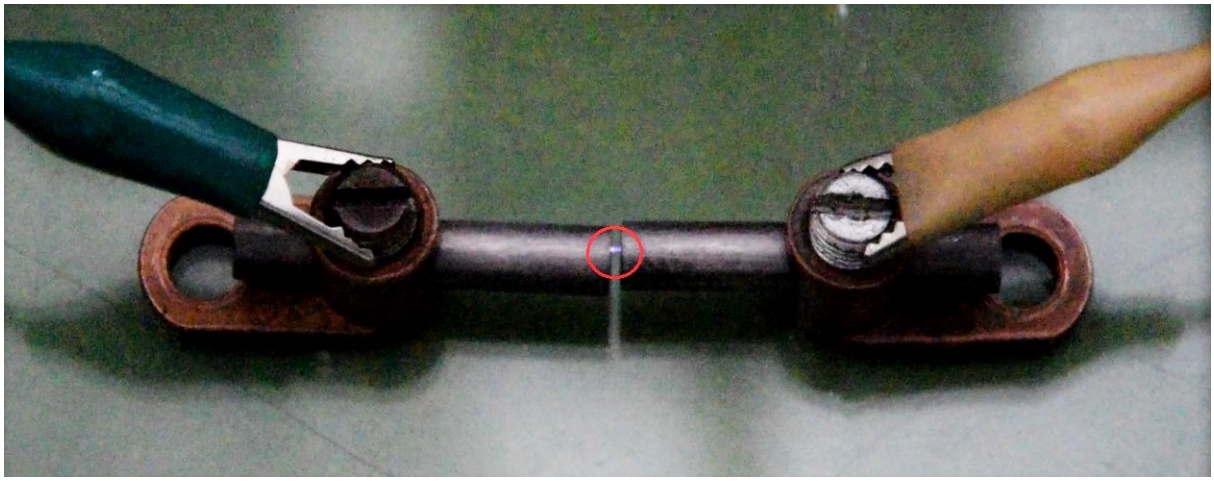
Slika 2.6: Kôd koji smo koristili u programu Wolfram Mathematica za crtanje podataka te funkcije prilagodbe.

Time smo mogli izračunati najvjerojatniju vrijednost napona i pripadnu grešku za pokrovno stakalce i grešku pretpostavljenog napona za zrak. Koristeći formulu (1.5) izračunali smo najvjerojatniju vrijednost dielektrične snage zraka te pripadnu standardnu grešku. Na kraju, kako bi odredili dielektričnu snagu pokrovnog stakalca, poslužit ćemo se dobivenom vrijednošću za dielektričnu snagu zraka.

Poglavlje 3

Rezultati i diskusija

Slika 3.1 prikazuje trenutak kad dolazi do proboja. Na slici se jasno vidi iskra koja pri tome nastaje.



Slika 3.1: Iskra koja nastaje savladavanjem dielektrične snage zraka.

Rezultati mjerenja vremena između nastajanja iskre za zrak i pokrovno stakalce navedeni su u tablici 3.1.

	d (mm)	t_{10} (s)			t_1 (s)	t_2 (s)
		1	2	3		
zrak	0.2	44.97	42.05	42.47		
pokrovno stakalce	0.2				12	33.47

Tablica 3.1: Mjerenje vremena između proboja.

Iz tablice izračunamo vrijeme između dva proboja. Ako s t_z označimo vrijeme dobiveno za zrak te s t_{ps} vrijeme dobiveno za pokrovno stakalce, slijedi:

$$t_z = (4.3 \pm 0.2)\,\mathrm{s},$$

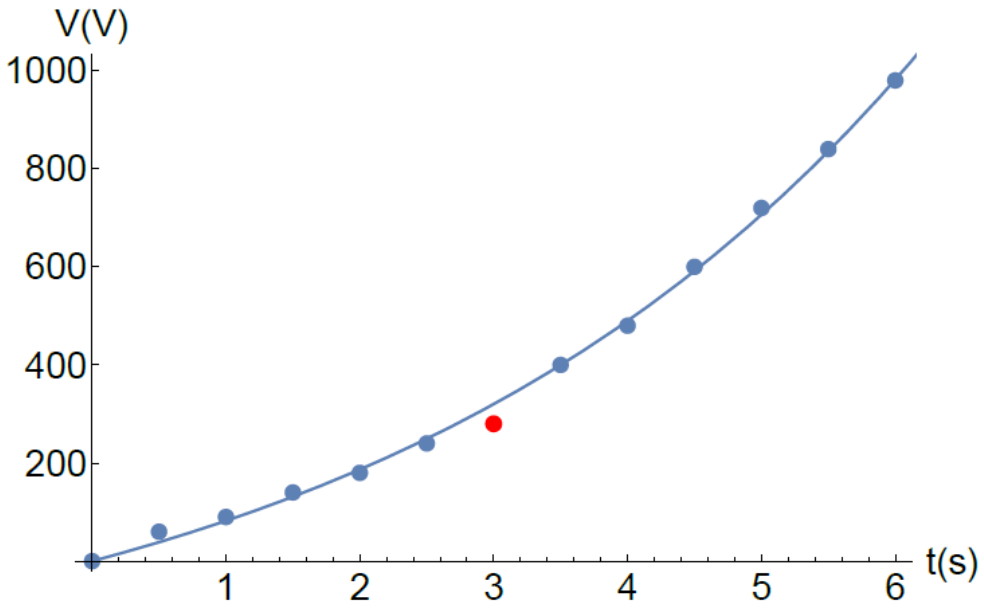
$$t_{ps} = (14 \pm 3)\,\mathrm{s}.$$

Nadalje, u tablici 3.2 prikazane su dobivene vrijednosti kuta otklona listića elektroskopa pri čemu je od svakog kuta oduzet početni otklon nenabijena elektroskopa, a to je kut od 11°.

redni broj sličice	kut otklona (°)
1.	0
6.	3
11.	4.5
16.	7
21.	9
26.	12
31.	14
36.	20
41.	24
46.	30
51.	36
56.	42
61.	49

Tablica 3.2: Mjerenje otklona kuta listića na elektroskopu.

Iz tablice 3.2 dobivamo graf 3.2 na kojem je prikazan napon kao funkcija vremena. Na grafu je crvenom bojom označena točka koju smo izbacili iz razmatranja. Već samim pogledom na točke koje su dobivene u grafu, uočavamo da ta točka malo odskače od ostalih točaka. Razlog izbacivanja te točke iz promatranja je to da pri modeliranju nelinearnom funkcijom, s i bez te crvene točke, p-vrijednost parametara kojima opisujemo našu funkciju puno je manja ako u razmatranje ne uzmemo tu točku.



Slika 3.2: Graf ovisnosti iznosa napona o vremenu.

Vrijednosti parametara i pripadne standardne pogreške dobivenih uz pomoć programa Wolfram Mathematica, korištenjem kôda na slici 2.5, prikazani su na slici 3.3.

Out[22]= FittedModel[300.244 (-1+e^0.242416 x)]

Out[23]= { 300.244 (-1 + e^0.242416 x) ,

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
A	300.244	19.7894	15.172	3.1333 ×10^-8
B	0.242416	0.00911111	26.6066	1.29801 ×10^-10

}

Slika 3.3: Vrijednosti parametara dobivenih pomoću programa Wolfram Mathematica.

Modeliranjem dobivenih točaka funkcijom (2.1), pomoću programa Wolfram Mathematica, dobivamo vrijednosti za konstante prilagodbe:

$$A = (300 \pm 20)\,\mathrm{V},$$
$$B = (0.242 \pm 0.009)\,\mathrm{s}^{-1}.$$

Odredit ćemo pomoću prilagodbe dielektričnu snagu zraka, ali prije toga moramo odrediti iznos napona u zraku. Uvrštavanjem srednje vrijednosti vremena dobivenog

za zrak u jednadžbu (1.5) dobivamo iznos srednje vrijednosti napona, koja iznosi:

$$\overline{V_z} = 549\,\mathrm{V}.$$

Sada ćemo izračunati pripadnu grešku. Standardnu devijaciju napona za zrak σ_{V_z} odredit ćemo pomoću standardnih devijacija σ_A za konstantu A , σ_B za konstantu B i σ_{t_z} za izmjereno vrijeme za zrak te srednjih vrijednosti za iste i srednju vrijednost napona zraka na sljedeći način:

$$\begin{aligned}
\sigma_{V_z} &= \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial A}\right)^2 \sigma_A^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial B}\right)^2 \sigma_B^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial t_z}\right)^2 \sigma_{t_z}^2} \\
&= \sqrt{\left(e^{Bt_z} - 1\right)^2 \sigma_A^2 + \left(At_z e^{Bt_z}\right)^2 \sigma_B^2 + \left(ABe^{Bt_z}\right)^2 \sigma_{t_z}^2} \\
&= 64\,\mathrm{V}.
\end{aligned}$$

Dakle, iznos napona za zrak je:

$$V_z = (550 \pm 60)\,\mathrm{V}.$$

Kod mjerenja udaljenosti između elektroda moramo uzeti u obzir pogrešku, jer može doći do laganih pomicanja uzrokovanih ljudskim faktorom pri baratanju volframovim štapićima. Tad za udaljenost vrijedi:

$$d = (0.20 \pm 0.02)\,\mathrm{mm}.$$

Koristeći formulu (1.5), izračunat ćemo dielektričnu snagu zraka ε_z. Dobivamo sljedeće:

$$\overline{\varepsilon_z} = 2750\,\mathrm{V/mm}.$$

Također ćemo odrediti standardnu devijaciju σ_{ε_z} pomoću standardnih devijacija σ_{V_z} za napon u zraku i σ_d za udaljenost te srednjih vrijednosti za iste i srednju vrijednost dielektrične snage zraka na sljedeći način:

$$\begin{aligned}
\sigma_{\varepsilon_z} &= \sqrt{\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial V}\right)^2 \sigma_{V_z}^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial d}\right)^2 \sigma_d^2} \\
&= \sqrt{\left(\frac{1}{d}\right)^2 \sigma_{V_z}^2 + \left(-\frac{V_z}{d^2}\right)^2 \sigma_d^2} \\
&= \sqrt{\left(\frac{1}{d^2}\right) \sigma_{V_z}^2 + \left(\frac{V_z^2}{d^4}\right) \sigma_d^2} \\
&= 407\,\mathrm{V/mm}.
\end{aligned}$$

Konačno, dielektrična snaga zraka je:

$$\varepsilon_z = (2800 \pm 400)\,\mathrm{V/mm}.$$

Odnosno, ako zapišemo u SI sustavu:

$$\varepsilon_z = (2.8 \pm 0.4)\,\mathrm{MV/m}.$$

Relativna nepouzdanost mjerenja R_n iznosi 14.2%. Usporedbom srednje vrijednosti dobivene dielektrične snage zraka s tabličnom vrijednosti dielektrične snage zraka (vidi tablicu 1.1) dobije se relativno odstupanje 6.67%, što potvrđuje da smo krenuli s dobrom pretpostavkom prilikom prilagodbe.

Dielektričnu snagu pokrovnog stakalca ε_{ps} odredit ćemo pomoću iznosa dielektrične snage zraka ε_z dobivene prethodnim računom. No, najprije moramo odrediti napon proboja za stakalce. Kao i u prethodnom slučaju uvrštavanjem srednje vrijednosti vremena dobivenog za stakalce u jednadžbu (2.1) dobivamo iznos srednje vrijednosti napona, koja iznosi:

$$\overline{V_{ps}} = 8582\,\mathrm{V}.$$

Standardnu devijaciju napona za pokrovno stakalce σ_{V_z} odredit ćemo analogno kao i kod slučaja za napon zraka, pazeći da se sada uvrštava vrijeme za pokrovno stakalce. Dobivamo sljedeće:

$$\begin{aligned} \sigma_{V_{ps}} &= \sqrt{\left(e^{Bt_{ps}}-1\right)^2\sigma_A^2 + \left(At_{ps}e^{Bt_{ps}}\right)^2\sigma_B^2 + \left(ABe^{Bt_{ps}}\right)^2\sigma_{t_z}^2} \\ &= 6569\,\mathrm{V}. \end{aligned}$$

Iznos napona proboja za pokrovno stakalce je:

$$V_{ps} = (9000 \pm 6000)\,\mathrm{V}.$$

Kad bi sada ponovili isti račun za dielektričnu snagu pokrovnog stakalca, kao i kod dielektrične snage zraka, dobili bi:

$$\varepsilon_{ps} = (50000 \pm 40000)\,\mathrm{V/mm} = (50 \pm 40)\,\mathrm{MV/m}.$$

Vidimo da je greška jako velika. Uzrok te velike greške je velika greška kod izmjerenog vremena. Zbog teško ponovljivog mjerenja, nismo bili u mogućnosti preciznije izmjeriti vrijeme. Zbog toga ćemo se u daljnjem računu ograničiti na srednju vrijednost napona za pokrovno stakalce. Stavljajući u omjer dielekričnu snagu zraka i

dielektričnu snagu pokrovnog stakalca te koristeći formulu (1.5) dobivamo sljedeće:

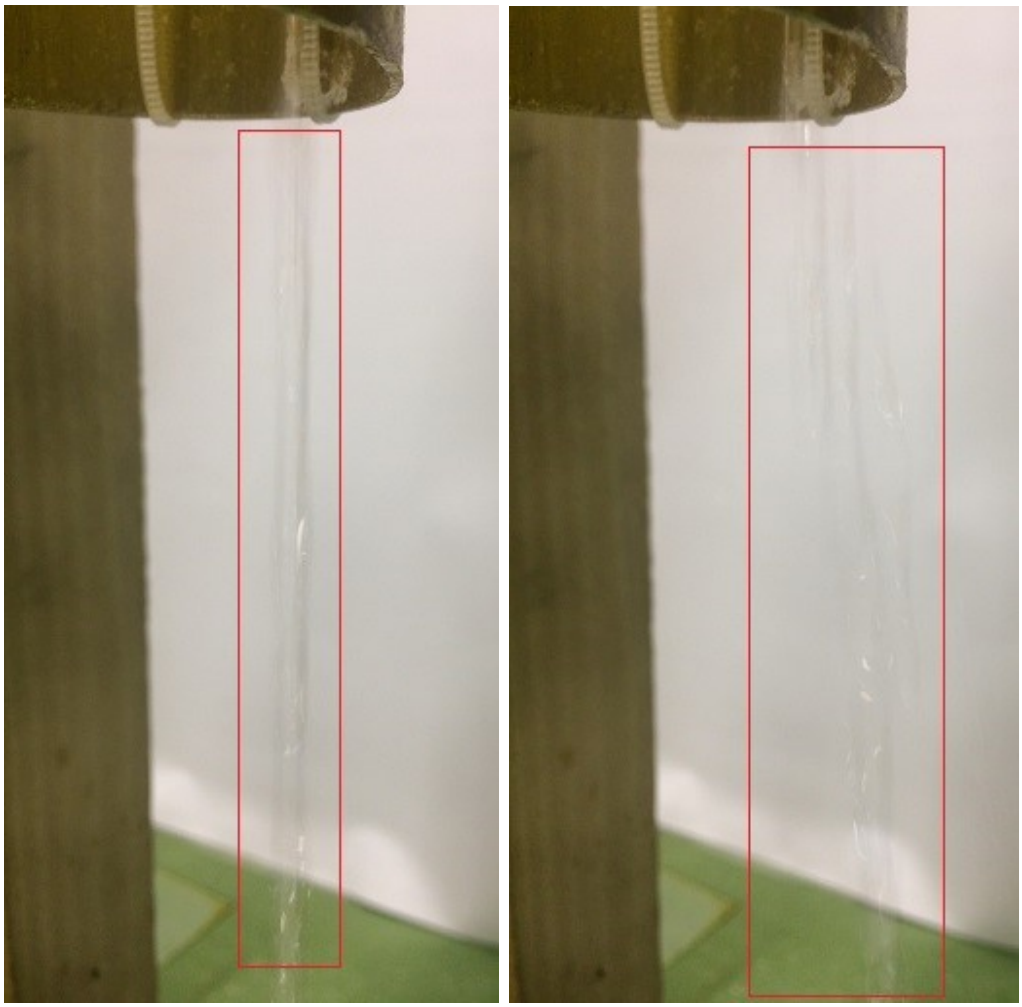
$$\frac{\varepsilon_{ps}}{\varepsilon_z} = \frac{\frac{V_{ps}}{d}}{\frac{V_z}{d}} = \frac{V_{ps}}{V_z}.$$

Ako izrazimo ε_{ps} slijedi:

$$\varepsilon_{ps} = \frac{V_{ps}}{V_z}\varepsilon_z = 45.8\,\mathrm{MV/m}.$$

Usporedbom srednje vrijednosti dobivene dielektrične snage pokrovnog stakalca s tabličnom vrijednosti dielektrične snage borosilikatnog stakla (vidi tablicu 1.1) uočavamo da naš rezultat ne odstupa puno od tablične vrijednosti.

Radeći mjerenja, uočili smo jednu vrlo zanimljivu pojavu. Kako voda teče i kako se sustav nabija, mlaz vodenih kapljica se počinje širiti (vidi sliku 3.4). Mlaz se polako širi tijekom vremena, sve do trenutka kad ne dođe do proboja te se nakon proboja brzo vrati u uski cilindrični mlaz. Objašnjenje ove pojave je vrlo jednostavno. Ako je metalni prsten nabijen jednom vrstom električnog naboja, znamo da su kapljice vode tada nabijene drugom vrstom naboja. Kako između istoimenih naboja djeluje privlačna električna sila, kapljice se žele približiti metalnom prstenu. Zbog toga dolazi do širenja mlaza vodenih kapljica. Jasno je da što smo bliže trenutku stvaranja iskre, privlačna električna sila između kapljica i metalnog prstena je sve veća (električna sila je proporcionalna količini naboja) pa se mlaz kapljica jače raspršuje.



Slika 3.4: Rasipanje kapljica vode.

Poglavlje 4

Zaključak

Od vrlo pristupačnog materijala moguće je napraviti primitivni generator, odnosno postav Kelvinove kapaljke. Provedbom mjerenja i matematičkim računom zaključujemo da je moguće odrediti dielektričnu snagu zraka te borosilikatnog stakla. Kad bi se izrađeni postav Kelvinove kapaljke usavršio postigli bi veću točnost izmjerenih vrijednosti, a samim time i dielektričnih snaga. Postav koji je izrađen može služiti kao demonstracijski pokus za nastavu općih fizika i osnova fizika, a može se i unaprijediti kako bi proizvodio veći izboj, no za to bi ga trebalo dosta uvećati.

Bibliografija

[1] *Dielectric strength*
Dostupno na: https://en.wikipedia.org/wiki/Dielectric_strength#cite_note-CRC-6 (siječanj 2019.)

[2] Državno natjecanje i smotra iz fizike
Dostupno na: http://natjecanja.hfd.hr/smotra_natjecanje/2009-10/ss_exp_1.php (prosinac 2018.)

[3] *How to Make Kelvin Water Dropper/Lord Kelvin's Thunderstorm*, 8.2.2013.
Dostupno na: https://www.youtube.com/watch?v=dB-76NdfTbU (prosinac 2018.)

[4] *Kelvin's Thunderstorm by Abbey Watson*, 29.3.2015.
Dostupno na: https://www.youtube.com/watch?v=FCZOFlp9UC8 (prosinac 2018.)

[5] *Kelvin water dropper*
Dostupno na: https://en.wikipedia.org/wiki/Kelvin_water_dropper (prosinac 2018.)

[6] T. Knapen, *Analyzing and optimally controlling the Kelvin water dropper*, 2015.

[7] E. Kuffel, W. S. Zaeng, J. Kuffer, *High Voltage Engineering*, Newnes, Oxford, 2000.

[8] *Lord Kelvin*, Scottish Science Hall of Fame
Dostupno na: https://digital.nls.uk/scientists/biographies/lord-kelvin/ (prosinac 2018.)

[9] S. Ray, *An Introduction to High Voltage Engineering*, PHI Learning, New Delhi, 2013.

[10] *Sparks from Falling Water: Kelvin's Thunderstorm*, 23.10.2014.
Dostupno na: `https://www.youtube.com/watch?v=rv4MjaF_wow&t=132s` (prosinac 2018.)

[11] E. Thomson, *William Thomson, Lord Kelvin (1824-1907)*, Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences, sv. 51, br. 14 (1916), 896-899.

[12] W. Thomson, *On a self-acting apparatus for multiplying and maintaining electric charges, with applications to illustrate the voltaic theory*, Proceedings of the Royal Society of London, sv.16, br. 14 (1867), 67-72.

[13] *William Thomson, Baron Kelvin*, Encyclopædia Britannica
Dostupno na: `https://www.britannica.com/biography/William-Thomson-Baron-Kelvin` (prosinac 2018.)

[14] *William Thomson, 1st Baron Kelvin*
Dostupno na: `https://en.wikipedia.org/wiki/William_Thomson,_1st_Baron_Kelvin` (prosinac 2018.)

[15] Y. Xie, i sur., *High-efficiency ballistic electrostatic generator using microdroplets*, 2014.

[16] H. D. Young, R. A. Freedman, A. L. Ford, *Sears and Zemansky's University Physics with modern physics, 13th Edition*, PEARSON, San Francisco, 2012.

Sažetak

Kelvinova kapaljka je vrsta elektrostatskog generatora koji radi na principu razdvajanja naboja elektrostatskom indukcijom. Svrha kapaljke je demonstracija principa elektrostatike tijekom studija, a njena izrada služila bi kasnije kao demonstracijski postav za opće fizike i osnove fizike. Kapaljku je moguće izraditi od jeftinih, učestalih materijala, što će se i učiniti u prvoj verziji njene izvedbe. Nakon što se time demonstrira princip rada kapaljke, izradit će se prijenosna, stabilna verzija koja će se služiti kao demonstracijski postav. Konačno, pomoću postava će se izvršiti fizikalno mjerenje dielektrične snage čestih materijala kao što je staklo.

Summary

The Kelvin Water Dropper is a kind of an electrostatic generator which works on the principle of charge separation by electrostatic induction. The purpose of the Kelvin Water Dropper is to demonstrate the principles of electrostatics and its design would later serve as a demonstration set for general physics courses. The Water Dropper can be made from cheap, accessible materials, which will be done in the first iteration of its design. After demonstrating the principle of operation of the Kelvin Water Dropper, a portable, stable version will be created and will serve as a demonstrational setup. Finally, using the setup, we will measure the dielectric strength of common materials such as glass.

Životopis

Martina Horvat rođena je 11.2.1995. godine u Čakovcu. Osnovno obrazovanje stekla je najprije u Područnoj školi Cirkovljan od 2001. do 2005. godine, a zatim je nastavila osnovnoškolsko obrazovanje u Osnovnoj školi Prelog od 2005. do 2009. godine. Srednjoškolsko obrazovanje nastavila je u Srednjoj školi Prelog, smjer opća gimnazija. Srednju školu završila je 2013. godine te položila državnu maturu. Iste je godine upisala integrirani preddiplomski i diplomski sveučilišni studij Matematika i fizika; smjer: nastavnički na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu u Zagrebu.