

Rashladni sustav temeljen na Peltier efektu upravlján Arduinom

Kovačević, Mirna

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:166:438996>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-20**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Science](#)



SVEUČILIŠTE U SPLITU
PRIRODOSLOVNO MATEMATIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

**RASHLADNI SUSTAV TEMELJEN NA PELTIER EFEKTU
UPRAVLJAN ARDUINOM**

Mirna Kovačević

Split, lipanj 2024.

Temeljna dokumentacijska kartica

Diplomski rad

Sveučilište u Splitu

Prirodoslovno-matematički fakultet

Odjel za Politehniku

Ruđera Boškovića 33, 21000 Split, Hrvatska

RASHLADNI SUSTAV TEMELJEN NA PELTIER EFEKTU UPRAVLJAN ARDUINOM

Mirna Kovačević

SAŽETAK

Rashladni sustavi ključni su za održavanje kvalitete proizvoda u raznim industrijama te imaju važnu ulogu u svakodnevnom životu, pri čemu troše znatan udio svjetske energije. S porastom svijesti o globalnom zatopljenju, raste potreba za inovativnim, ekološki prihvatljivim rashladnim rješenjima. U ovom radu naglasak će biti na izradi prijenosnog uređaja za hlađenje temeljenog na Peltier modulu, upravljanog putem Arduino platforme, s ciljem testiranja njegove učinkovitosti. Analizirat će se performanse uređaja i rezultati temperaturnih mjerenja te razmotriti potencijalne modifikacije za poboljšanje njegovih karakteristika.

Ključne riječi: Peltier efekt, Peltier modul, rashladni sustav, Arduino

Rad je pohranjen u knjižnici Prirodoslovno-matematičkog fakulteta, Sveučilišta u Splitu.

Rad sadrži: 48 stranica, 19 grafičkih prikaza, 1 tablica i 54 literaturnih navoda.

Izvornik je na hrvatskom jeziku.

Mentor: **Dr. sc. Barbara Džaja**, *docent Prirodoslovno-matematičkog fakulteta, Sveučilišta u Splitu*

Neposredni voditelj: **Hrvoje Turić**, *predavač Prirodoslovno-matematičkog fakulteta, Sveučilišta u Splitu*

Ocjenjivači: **Dr. sc. Barbara Džaja**, *docent Prirodoslovno-matematičkog fakulteta, Sveučilišta u Splitu*

Hrvoje Turić, *predavač Prirodoslovno-matematičkog fakulteta, Sveučilišta u Splitu*

Dr. sc. Tomislav Matić, *izvanredni profesor Prirodoslovno-matematičkog fakulteta, Sveučilišta u Splitu*

Rad prihvaćen: lipanj 2024.

Basic documentation card

Graduate thesis

University of Split

Faculty of Science

Department of Polytechnics

Ruđera Boškovića 33, 21000 Split, Croatia

COOLING SYSTEM BASED ON THE PELTIER EFFECT CONTROLLED BY ARDUINO

Mirna Kovačević

ABSTRACT

Cooling systems are crucial for maintaining product quality in various industries and play an important role in everyday life, consuming a significant amount of world's energy. Due to the increasing awareness of global warming, the need for innovative, environmentally friendly cooling solutions is growing. This thesis will focus on developing a portable cooling device based on the Peltier module, controlled by the Arduino platform, with the aim of testing its efficiency. The device's performance and temperature measurement results will be analyzed and potential modifications to improve its characteristics will be considered.

Key words: Peltier effect, Peltier module, cooling system, Arduino

Thesis deposited in library of Faculty of science, University of Split

Thesis consists of: 48 pages, 19 figures, 1 table and 54 references

Original language: Croatian

Mentor: **Barbara Džaja, Ph.D.** *Assistant Professor of Faculty of Science, University of Split*

Immediate supervisor: **Hrvoje Turić,** *Lecturer of Faculty of Science, University of Split*

Reviewers: **Barbara Džaja, Ph.D.** *Assistant Professor of Faculty of Science, University of Split*

Hrvoje Turić, *Lecturer of Faculty of Science, University of Split*

Tomislav Matić, Ph.D. *Associate Professor of Faculty of Science, University of Split*

Graduate thesis accepted: June 2024.

IZJAVA

kojom izjavljujem s punom materijalnom i moralnom odgovornošću da sam diplomski rad s naslovom Rashladni sustav temeljen na Peltier efektu upravljani Arduinom izradila samostalno pod voditeljstvom pred. Hrvoja Turića. U radu sam primijenila metodologiju znanstvenoistraživačkog rada i koristila literaturu koja je navedena na kraju završnog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući navela u diplomskom radu na uobičajen, standardan način citirala sam i povezala s fusnotama s korištenim bibliografskim jedinicama. Rad je pisan u duhu hrvatskog jezika.

Student:

Mirna Kovačević

Sadržaj

| | |
|---|----|
| 1. Uvod..... | 1 |
| 2. Rashladni sustavi i njihov razvoj kroz povijest..... | 2 |
| 2.1. Rani razvoj..... | 2 |
| 2.2. Razvoj do 20. stoljeća..... | 3 |
| 2.3. Razvoj u 20. stoljeću | 6 |
| 2.4. Otkriće Peltierovog efekta i razvoj modula | 8 |
| 2.4.1. Počeci praktične uporabe termoelektriciteta | 9 |
| 2.4.2. Primjena Peltier modula | 9 |
| 2.4.3. Prednosti i nedostaci Peltier modula | 10 |
| 2.4.4. Dosadašnja istraživanja rashladnih sustava s Peltier modulom upravljanih Arduinom | 11 |
| 3. Izrada rashladnog sustava..... | 14 |
| 3.1. Korišteni elementi..... | 14 |
| 3.1.1. Peltier modul | 14 |
| 3.1.2. Ostali korišteni elementi..... | 17 |
| 3.1.3. Arduino..... | 18 |
| 3.2. Izrada uređaja | 21 |
| 3.2.1. Obrada elemenata i korišteni alati | 21 |
| 3.2.2. Konstrukcija uređaja i njegov princip rada | 23 |
| 4. Razvoj rashladnog sustava | 27 |
| 4.1. Povezivanje rashladnog uređaja s Arduino pločicom..... | 27 |
| 4.2. Programski kôd..... | 30 |
| 5. Testiranje funkcionalnosti sustava | 33 |
| 5.1. Uvjeti testiranja i očekivanja | 33 |
| 5.2. Rezultati testiranja | 34 |
| 5.3. Analiza rezultata | 35 |
| 6. Zaključak..... | 37 |

1. Uvod

Rashladni stroj dio je rashladne tehnike, grane tehnike koja se bavi pojavama i postupcima hlađenja te koja obuhvaća razvoj i konstrukciju rashladnih sustava, njihovo upravljanje, održavanje i popravak. Neke od zadaća rashladnog stroja, odnosno rashladnog sustava, su ostvarenje uvjeta za očuvanje kvalitete hrane na dulje periode, postizanje što ugodnije temperature za boravak i rad u nekom prostoru, očuvanje kvalitete zdravstvenih proizvoda te postizanje niskih temperatura u procesu ukapljivanja plinova. Rashladni stroj tako, najjednostavnije rečeno, predstavlja uređaj kojim se postiže hlađenje nekog prostora, robe ili predmeta [1], [2]. Mesna industrija, mliječna industrija, proizvodnja i distribucija voća i povrća, proizvodnja piva i vina te tvornice za preradu ribe na brodovima samo su neke od industrija gdje su rashladni strojevi ključni za održavanje kvalitete namirnica, stoga je lako zaključiti kako rashladni strojevi imaju vrlo važnu ulogu u raznim industrijama. Ljudima su rashladni strojevi jednako bitni i u svakodnevnom životu gdje se koriste u obliku hladnjaka, zamrzivača i klima uređaja, zbog čega se vode kao jedan od najvećih potrošača svjetske energije, a koriste otprilike 20 % ukupne energije [2], [3]. Kako u 21. stoljeću svijest o globalnom zatopljenju jača, tako potreba za inovativnim rashladnim rješenjima raste, a primarni cilj takvih rješenja jest da budu što ekološki prihvatljivija, energetski isplativija i učinkovitija. Uzimajući u obzir značaj rashladnih sustava, u ovome diplomskom radu bit će predstavljena izrada te ispitan rad i učinkovitost prijenosnog uređaja za hlađenje temeljenog na jednostavnom elektroničkom elementu vrlo malih dimenzija. Spomenuti element, čija bi uporaba mogla doprinijeti razvoju naprednijih i ekološki prihvatljivijih rashladnih rješenja, naziva se Peltier element ili Peltier modul, koji koristi termoelektrični efekt kako bi se postiglo hlađenje ili grijanje. Peltier modul će za potrebe ovog rada biti korišten kao izvor hlađenja, dok će njime ohlađen zrak biti raspršen u izolirani prostor određenog volumena kako bi se ispitala njegova učinkovitost. Upravljanje uređajem bit će ostvareno korištenjem Arduino platforme, koja pruža fleksibilnost i jednostavnost integracije sa sensorima i drugim elektroničkim komponentama potrebnima za funkcioniranje i praćenje rada sustava. Rad će se sastojati od povijesnog pregleda rashladnih uređaja kako bi se razumio kontekst i evolucija rashladne tehnologije, nakon čega će detaljno biti opisan proces izrade i razvoja samog uređaja te programskog kôda potrebnog za njegovo upravljanje. Testirat će se funkcionalnosti uređaja te će se analizom rezultata procijeniti njegova učinkovitost te razmotriti potencijalne modifikacije za poboljšanje njegovih performansi.

2. Rashladni sustavi i njihov razvoj kroz povijest

U ovome poglavlju naglasak će biti na povijesnome razvoju rashladnih uređaja od njegovih početaka koji datiraju stotinama godina prije nove ere, sve do modernoga doba, odnosno 21. stoljeća. Razvoj termoelektriciteta također će biti smješten u povijesni kontekst, kao i uporaba Peltierovog efekta u praktičnome smislu. Osim o područjima praktične uporabe Peltier modula, govorit će se i o njegovim glavnim prednostima i nedostacima. Spomenuta će biti i dosadašnja istraživanja o rashladnim sustavima koji su koristili Peltier modul kao rashladni element, a koji je upravlján Arduinom, kao i rezultati i zaključci tih istraživanja.

2.1. Rani razvoj

Tisućama godina unazad, ljudi su pokušavali pronaći način da produlje vijek, odnosno očuvaju kvalitetu i svježinu svojih namirnica te su otkrili da to mogu učiniti čuvajući ih na niskim temperaturama, a tada jedini način za postizanje toga bilo je iskorištavanje prirodnih resursa – snijega i leda. Kineska civilizacija bila je jedna od prvih koja je počela vaditi i prikupljati led iz jezera već oko 1000. godine pr. n. e. u svrhu očuvanja hrane, te su čak održavali vjerske obrede punjenja i pražnjenja takvih spremišta leda [4]. Zatim, oko 400. godine pr. n. e. na području tadašnjeg Perzijskog Carstva, ljudi su usavršili tehniku skladištenja leda u pustinjama u svrhu konzervacije namirnica čak i u najtoplijim ljetnim danima – činili su to donoseći velike količine leda s obližnjih planina tijekom zime te skladišteći ih u posebne strukture koje su nazivali Yakhchal. To su bile građevine koje su se sastojale od velike kupole na površini izgrađene od glinenih opeka, izolirane zidovima širine 2 metra te visine od oko 15 metara (Slika 1). Ispod kupole, na dubini od oko 5 metara, nalazio se veliki prostor za skladištenje čiji je volumen znao dosezati do 5000 m³, a led su održavali smrznutim i dodatnim sustavima hlađenja iskorištavajući vodu i vjetar. Svaki Yakhchal imao je na dnu poseban rov za hvatanje vode koja bi se otopila te bi se takva voda ponovno zamrzнула tijekom hladnih pustinjskih noći - led bi se tada ponovno lomio i premještao u jame duboko u zemlji [4], [5].



Slika 1 Izgled Yakhchal-a, područje današnjeg Irana

Neki su narodi, poput Rimljana i Grka, koristili vrlo slične načine hlađenja svojih namirnica – stavljali bi velike količine snijega u jame te ih pokrivali raznim izolacijskim materijalima poput trave i granja [4]. U drevnom Egiptu je, s druge strane, korišteno tzv. hlađenje isparavanjem – princip hlađenja koji koristi činjenicu da voda apsorbira toplinu iz zraka kada isparava, što uzrokuje hlađenje okolnog zraka. Egipćani su koristili hlađenje isparavanjem izlivanjem vode preko poroznih zemljanih posuda koje su postavljali ispred prozora, odnosno na mjesta gdje je zrak mogao slobodno strujati preko njih. Kako bi voda isparavala iz posuda, tako bi hladila zrak oko njih, stvarajući prirodni oblik klimatizacije i hladeći prostor. Procjenjuje da ovakav sustav hlađenja datira iz vremena Staroga Kraljevstva, odnosno između 2686. godine pr. n. e. i 2181. godine pr. n. e., a ovakvi se principi koriste i danas u modernim sustava klimatizacije [6].

2.2. Razvoj do 20. stoljeća

Unatoč činjenici da su tehnike hlađenja prikupljanjem i skladištenjem snijega i leda bile vrlo složene te često opasne za ljude, postoje dokazi da su se slične tehnike koristile sve do kraja 19. stoljeća – na primjer, u Velikoj Britaniji, gdje je ovakva tehnika zaživjela početkom 17. stoljeća, led bi se sakupljao i stavljao u jame, tzv. ledenice, mjesta gdje su se pohranjivale ploče leda pod zemljom kako bi ostale zamrznute do ljeta. Dizajni ledenica bili su različiti, no uglavnom su bile cilindričnog ili stožastog oblika te obložene ciglama s debelim zidovima nabijenima slamom ili piljevinom zbog izolacije. U Sjedinjenim Državama, na primjer, bio je

vrlo tražen prirodni led dobiven iz netaknutih rijeka i jezera sjevernih država, posebice onih u Novoj Engleskoj - sakupljeni led se u velikim količinama spremao u ledenice i prekrivao piljevinom zbog izolacije. Upravo taj led, kao i led iz skandinavskih zemalja, često se uvezio i u samu Veliku Britaniju kako bi u potpunosti zadovoljio potrebe Britanaca za hlađenjem u tom razdoblju [4], [7].

Teško je odrediti točan period kada se tehnikama hlađenja počelo pristupati sa strogo znanstvenog gledišta, no neki izvori tvrde da je jedan od prvih pojedinaca koji se time bavio bio irski kemičar, fizičar i izumitelj Robert Boyle u svome djelu *Historia Experimentalis de Frigore* iz 1665. godine, u kojoj se spominje da se voda zamrzavala miješanjem sa solju [8], [9]. Nešto kasnije, slične pokuse izvodili su engleski kemičar i liječnik Charles Blagden koji je 1783. godine, miješanjem snijega i razrijeđene sumporne kiseline, postigao temperaturu od -40°C , te njemačko-ruski kemičar i farmaceut Tobias Lowitz koji je 1793. godine, miješajući snijeg i kalcijev klorid, postigao temperaturu od -50°C [1].

Stroj koji se često navodi kao prvi „pravi“ hladnjak jest eksperiment škotskog profesora Williama Cullena sa Sveučilišta u Glasgowu, koji je prvi uočio da isparavanje organskog otapala, etilnog etera, prati pad temperature, odnosno da brzo isparavanje tekućine u plin rezultira efektom hlađenja. Cullen je 1755. godine stoga proizveo laboratorijski uređaj kojim je dobivao led isparavanjem vode ispod staklenog zvona isisavanjem zraka, odnosno pod smanjenim tlakom. Unatoč Cullenovu inovativnom pristupu, njegovo otkriće nije bilo praktično za šire komercijalno korištenje ili za svakodnevnu uporabu [4], [9]. Američki državnik, znanstvenik i izumitelj Benjamin Franklin također se bavio proučavanjem procesa hlađenja te je 1758. godine, radeći eksperimente sa živinim termometrom, samo potvrdio saznanja Williama Cullena - da se isparavanje tekućina poput alkohola i etera može koristiti za snižavanje temperature predmeta ispod točke ledišta vode [10].

Suvremeni mehanički postupci hlađenja kakve poznajemo danas nastali su iz rada brojnih izumitelja 19. stoljeća. Godine 1805. američki izumitelj Oliver Evans dizajnirao je nacrt za prvi rashladni stroj, odnosno opisao rad zatvorenog, kružnog, parnog kompresijskog rashladnog procesa za potrebe proizvodnje leda s pomoću etera pod vakuumom. Evans svoju ideju nikada nije preveo u djelo - tek je 1834. godine američki izumitelj Jacob Perkins napravio prvi praktični rashladni stroj na temelju Evansova dizajna za hlađenje s pomoću ciklusa kompresije pare, odnosno isparavanja etera u kružnom procesu. Iako funkcionalan, njegov uređaj nikada nije doživio komercijalni uspjeh [1], [4]. U 1840-ima, John Gorrie,

američki liječnik, fizičar i izumitelj iz Floride, vjerovao je da bi hlađenje moglo ključno sredstvo za borbu protiv bolesti poput malarije, te rješenje za ugodniji boravak ljudi u zatvorenim prostorima za vrijeme visokih ljetnih temperatura, osobito u bolnicama. Stoga je Gorrie osmislio sustav unutarnjeg hlađenja bolničkih soba koji je uključivao transport velikih blokova leda iz zaleđenih jezera i potoka sjevernih država SAD-a u Floridu. Kako bi izbjegao ovakav skupi logistički izazov, Gorrie je počeo eksperimentirati s konceptom umjetnog hlađenja te je naposljetku osmislio stroj za proizvodnju leda koristeći kompresor pokretan konjskom snagom, jedrима pokrenutim vjetrom ili parom. Uređaj bi puštao zrak kroz ledeni blok, hladeći sobe u kojima su ležali pacijenti oboljeli od malarije. Gorrie je dobio patent za stroj za proizvodnju leda 1851. godine, no svoj izum nije uspio „progurati“ na tržište, ponajprije zbog smrti svog glavnog financijskog podupiratelja. Ipak, njegov je rad postavio temelje za modernu klimatizaciju i hlađenje [11-13].

Prvi primjenjivi parni kompresijski rashladni uređaj koji je koristio eter, alkohol ili amonijak kao radnu tvar za proizvodnju leda izgradio je australski izumitelj James Harrison 1854. godine. Harrisonom rashladni stroj koristio je kompresor za potiskivanje pare etera kroz kondenzator, gdje se eter hladio i pretvarao u tekućinu – takav ukapljeni plin cirkulirao bi kroz zavojnice za hlađenje te je, dok bi se vraćao u oblik pare, hladio okolni stroj. Koristeći zamašnjak veličine pet metara, njegov je stroj mogao proizvesti oko 3000 kilograma leda dnevno te je 1856. bio zaštićen patentom pod nazivom „*Refrigerating Machine*“ [1], [14]. Transportom smrznutog ovčjeg mesa jedrenjakom Dunedinom, opremljenim rashladnim uređajem sa zrakom kao radnom tvari i pogonjenim parnim strojem, 1882. godine ostvaren je prvi komercijalno uspješan međukontinentalni prijevoz hlađene robe. Putovanje je krenulo iz grada Dunedina u Novom Zelandu, a roba je uspješno dostavljena u London [1].

Posljednji značajniji patent koji bi se mogao navesti kao veća prekretnica u rashladnoj tehnici 19. stoljeća bio je onaj njemačkog znanstvenika Carla von Lindea iz 1876. godine – njegovo tadašnje istraživanje teorije topline dovelo je do izuma prvog pouzdanog i potpuno učinkovitog hladnjaka na komprimirani amonijak. Dakle, iako je mnogo rashladnih uređaja bilo razvijeno ranije, Lindeov je bio prvi uređaj dizajniran s ciljem preciznih proračuna i učinkovitosti. Tvrtka koju je osnovao za promoviranje ovog izuma bila je, stoga, međunarodni uspjeh - hlađenje je vrlo brzo zamijenilo led u rukovanju hranom i uvedeno je u mnoge industrijske procese [15], [16].

2.3. Razvoj u 20. stoljeću

Krajem 19. stoljeća došlo je do blage stagnacije u razvoju rashladnih uređaja, no već na samome početku 20. stoljeća došlo je prvog izuma koji bi se mogao povezati s današnjim, modernim klima uređajima, a za to je zaslužan američki inženjer Willis Carrier. Carrier je radio u kompaniji Buffalo Forge smještenoj u gradu Buffalo u saveznoj državi New York, tada jednoj od vodećih kompanija u proizvodnji ventilatora te opreme za rukovanje zrakom za industrijske i komercijalne svrhe. Kao njihov zaposlenik, Carrier je dobio zadatak riješiti problem vlage zbog koje su se gužvale stranice časopisa u jednoj izdavačkoj tvrtki u Brooklynu. Koristeći koncepte mehaničkog hlađenja uspostavljenih ranije, Carrier je 1902. osmislio i izradio revolucionarni sustav koji je nazvao „*Apparatus for Treating Air*“, što bi se moglo prevesti kao uređaj za tretiranje, odnosno obradu zraka. Takav sustav radio je na principu strujanja zraka preko rashladnih zavojnica, što bi hladio zrak te istovremeno uklanjalo vlagu [12], [18]. Osim odvlaživanja zraka hlađenjem vode, sustav je mogao ovlažiti zrak grijanjem vode – razina vlage se tako mogla povećati, odnosno spustiti za 55%. Usavršavajući svoju tehnologiju, Carrier je naposljetku razvio i patentirao automatski sustav upravljanja za regulaciju vlažnosti i temperature zraka u tvornicama tekstila [11], [18].

Nakon Carrierovog izuma rashladni uređaji doživjeli su tržišni procvat – osim u tvornicama tekstila, koristili su se i u tiskarama, tvornicama farmaceutskih proizvoda, bolnicama i raznim drugim ustanovama. Komforno hlađenje po prvi je put bilo predstavljeno široj javnosti 1904. godine na Svjetskome sajmu u St. Louisu, čiji su organizatori upotrijebili mehaničko hlađenje kako bi hladili dijelove zgrade Missouri State Building u kojoj su se održavala sajamska događanja. Sustav je koristio oko 1000 m³ zraka u minuti za hlađenje gledališta s 1000 sjedala te druge prostorije unutar zgrade [11], [12]. Prvi slučaj ugradnje rashladnog, odnosno klima uređaja za privatne svrhe zabilježen je 1914. godine, no tijekom prvog vala instalacija takvi uređaji su bili izrazito skupi, velikih dimenzija te potencijalno opasni zbog upotrebe otrovnog amonijaka. Stoga je 1922. Carrier predstavio novi princip hlađenja koji je, umjesto štetnog amonijaka, koristio bezopasni rashlađivač te je smanjio veličinu rashladne jedinice. Iste godine došlo je do još jednog velikog napretka u rashladnoj tehnologiji, kada su u Americi kazališta i kina postajala sve popularnija. Rani sustavi hlađenja javnih kazališta radili su na principu distribucije hladnog zraka kroz ventilacijske otvore na podu, što bi rezultiralo vrućim, sparnim uvjetima na gornjim razinama i mnogo nižim temperaturama na nižim razinama kazališta. Carrierova je tvrtka uspjela riješiti taj problem te je 1922. godine ugradila

prvi dobro osmišljen sustav hlađenja za kina u Los Angelesu - zrak se pumpao kroz više otvore, što je rezultiralo ravnomjernijom raspodjelom hlađenja te boljom kontrolom vlažnosti. Godine 1925. Carrier je u kazalištu Rivoli u New Yorku predstavio centrifugalni sustav hlađenja koji je koristio centrifugalni kompresor - rashladni plin bi se komprimirao s pomoću centrifugalne sile stvorene rotorima koji su se vrtjeli velikom brzinom [11-13], [19]. Zbog svoje jednostavnije konstrukcije i veće pouzdanosti u usporedbi s dotadašnjim sustavima, ubrzo se počeo koristiti i u poslovnim zgradama te robnim kućama, a 1929. godine ugradila ga je i Bijela Kuća. Iako pouzdaniji i jeftiniji od prijašnjih, ovakav sustav još uvijek je bio prevelik i preskup za široku primjenu [11], [13].

Oko 1930. godine, američki inženjer Thomas Midgley, tada zaposlenik kompanije General Motors, uspio je sintetizirati prvu rashladnu, manje opasnu radnu tvar koja će postati prva nezapaljiva rashladna tekućina na svijetu. Radilo se o CFC – u, odnosno klorofluorugljiku, sintetički kloriranom i fluoriranom derivatu metana i etana, poznatijem pod komercijalnom nazivu freon. Razvoj freona često smatra početkom razvoja moderne rashladne tehnike te primjene hlađenja u svakodnevnom životu, posebice zbog znatno povećane sigurnosti klima uređaja. Međutim, nekoliko desetljeća kasnije, otkriveno je kako su CFC rashladne tekućine vrlo štetne za atmosferu te da utječu na razgradnju ozonskog omotača, što je rezultiralo postupnim ukidanjem takvih tekućina 1990-ih diljem svijeta nakon Montrealskog protokola iz 1987. godine. Nakon saznanja o štetnosti CFC - a, sve više se počinju koristiti hidrofluorouglikovodici (HFC), spojevi koji ne uništavaju ozon, no kako se i ti spojevi dovode u vezu s globalnim zatopljenjem, počinju se tražiti nova rashladna sredstva i tehnologije, manje štetne za planet [1], [12].

Paralelno s otkrićem freona, na tržištu se pojavio prvi sobni, puno manji klima uređaj koji se mogao postaviti na rub prozora, a izradili su H.H. Schultz i J.Q. Sherman 1931. godine. Uređaj se na tržištu pojavio 1932. godine te je bio sličan današnjim prijenosnim rashladnim jedinicama, no zbog svoje visoke cijene tada nije doživio komercijalni uspjeh. Američki inženjer Henry Galson razvio je jeftiniju i kompaktniju inačicu prozorskog klima uređaja tijekom 1940-ih godina, a do 1947. godine prodano je čak 43000 ovakvih uređaja. Tako je tehnologija, u početku zamišljena kao alat za povećanje industrijske produktivnosti, postala gotovo nužna u kućanstvima - do kasnih 1960-ih, većina novih američkih domova imalo je vlastiti klima uređaj, a prozorski klima uređaji bili su pristupačniji no ikad [12], [13].

U drugoj polovini 20. stoljeća, rashladni sustavi razvijali su se i postajali sve funkcionalniji - primjerice, zbog izuma rotacijskog kompresora rashladni uređaji mogli su poprimiti manje dimezije te ostvariti manje bučan rad uz veću učinkovitost, a razvijena je i posebna oprema za toplinske pumpe koja je omogućavala ciklus hlađenja i grijanja koristeći isti stroj. Od 1980. do 1990. energija korištena za klimatizaciju se udvostručila, te je bilo jasno kako će biti potrebno pronaći način za proizvodnju energetski učinkovitijih jedinica u skladu s modernim zakonima o zakonu okoliša te ranije spomenutog Montrealskog protokola iz 1987. godine [21], [22].

2.4. Otkriće Peltierovog efekta i razvoj modula

Iako se termoelektricitet u kontekstu rashladne tehnike počeo koristiti tek sredinom 20. stoljeća, pojavu i proces pretvaranja toplinske energije u električnu, odnosno električne energije u toplinsku, znanstvenici su otkrili još u prvoj polovini 19. stoljeća [23], [24]. Znanstvenik koji je imao veliki doprinos u razumijevanju termoelektričnih efekata bio je njemački znanstvenik Thomas Johann Seebeck koji je 1821. godine otkrio pojavu koja je kasnije dobila naziv Seebeckov efekt. Ono što je Seebeck otkrio jest da će električna struja teći kroz strujni krug koji se sastoji od dva različita vodiča, pod uvjetom da se spojevi na kojima se spajaju održavaju na različitim temperaturama. Međutim, Seebeck nije mogao objasniti stvarni znanstveni razlog iza ovog fenomena te je pogrešno zaključio da strujanje topline proizvodi isti učinak kao strujanje struje [25].

Nekoliko godina kasnije, 1834. godine, francuski urar i fizičar Jean Charles Athanase Peltier je, analizirajući Seebeckov rad, primijetio kako se toplina može apsorbirati na jednom spoju različitih metala, a otpuštati na drugome spoju u istome strujnom krugu. Tek je 1838. godine ruski akademik Emilij Lenz dokazao da je takav efekt, danas poznat kao Peltierov efekt, zapravo neovisna fizikalna pojava koja se sastoji u oslobađanju i apsorpciji dodatne topline na spojevima vodiča kada kroz njih prolazi struja. Dokazao je da sama priroda procesa, odnosno apsorpcija ili otpuštanje topline, ovisi o smjeru struje te da je toplina koja se apsorbira ili stvara na spoju proporcionalna električnoj struji. Dvadesetak godina kasnije, engleski fizičar William Thomson, poznatiji kao Lord Kelvin, naposljetku je uspio znanstveno objasniti i Seebeckov i Peltierov učinak te dokazati njihov međusobni odnos [25-27].

2.4.1. Počeci praktične uporabe termoelektriciteta

Iako je znanstvenicima termoelektricitet kao pojava bio poznat dugi niz godina, od otkrića efekata termoelektriciteta pa do aktivnog istraživanja tog područja u svrhu njegove praktične uporabe prošlo je gotovo cijelo stoljeće. Tek se oko 1930. godine ponovno javilo zanimanje za taj fenomen, kada su ruski znanstvenici počeli istraživati ranije radove o termoelektričnim učincima, što je dovelo do razvoja prvih termoelektričnih uređaja 50 – ih godina [25]. Jedan od prvih istraživača termoelektričnog fenomena bio je istaknuti ruski znanstvenik i fizičar Abram Fedorovich Ioffe, čiji je istraživački rad poslužio kao osnova za budući razvoj i primjenu termoelektričnih materijala i uređaja. Ioffe se zalagao za upotrebu poluvodiča u termoelektronici te je smatrao da materijali koje čine određeni spojevi, poput spojeva kemijskog elementa telura sa antimonom, bizmutom ili olovom, imaju puno bolje termoelektrične vrijednosti. Stoga su Ioffe i suradnici na institutu u Sankt Petersburgu aktivno provodili istraživanja, što će rezultirati razvojem prvog komercijalnog termoelektričnog generatora i modula za hlađenje 1948 godine u SSSR – u.

Napredak u obradi poluvodičkih materijala ubrzo je doveo do razvoja termoelektričnih generatora i rashladnih modula s većom učinkovitošću te, kao rezultat toga, pokušaja širenja takvih uređaja na tržište. Poseban doprinos razvoju imao je spoj bizmut telurid, kemijske formule Bi_2Te_3 , koji se i trenutno koristi u termoelektričnim modulima, a koji je omogućio razvoj praktičnih termoelektričnih uređaja za postizanje temperatura ispod temperature okoline bez upotrebe kompresijskog hlađenja pare. Međutim, uspjeh termoelektričnih uređaja vrlo je brzo zasjenio golem napredak i uspjeh sektora proizvodnje baterija te je, unatoč svojim prednostima, termoelektrika potisnuta u samo nekoliko sektora tržišta. Ponovno zanimanje za termoelektricitet javilo se 1990 – ih godina, kada je globalna potreba za alternativnim izvorima energije potaknula interes za razvoj jeftinijih i ekološki prihvatljivih termoelektričnih materijala. [24], [27], [28].

2.4.2. Primjena Peltier modula

Uporaba Peltier modula dobija na većem značaju krajem 1960 – ih, kada je američka tvrtka IBM (eng. *International Business Machines Corporation*), jedna od vodećih tvrtki u razvoju računarstva i informacijskih tehnologija, iskazala interes za termoelektrično hlađenje. Jedna

od IBM - ovih prvih primjena modula bila je ona za hlađenje optičke diode, ključne za ostvarivanje optičke podatkovne veze između dva računala [24], [29]. Od 60 – ih godina pa do danas, Peltier moduli uspješno su se proširili u razne sektore, no njegova primjena još uvijek dominira u elektronici gdje se najčešće koristi kao uređaj za hlađenje raznih čipova, poput centralne procesorske jedinice ili kod laserskih dioda koje za ispravan rad zahtijevaju održavanje konstantne temperature. Koristi se i u određenim digitalnim kamerama koje, izložene okolini visoke temperature, mogu izgubiti preciznost, kao i kod uređaja za noćno gledanje, čiji se senzori mogu hladiti kako bi se postigli što bolji rezultati te izbjegli potencijalni problemi sa šumom. Primjena Peltier modula javlja se i u biotehnološkoj industriji jer omogućuje veliki temperaturni raspon, visoku temperaturnu stabilnost i preciznost u tzv. PCR uređajima koji služe za sintezu, odnosno umnožavanje specifičnih dijelova DNA, a koristi se i za proces krioprezervacije u kojemu je ključno da se stanice, tkiva i drugi biološki materijali očuvaju na izuzetno niskim temperaturama. U automobilskoj industriji Peltier element se koristi za hlađenje litij - ionske baterije električnih automobila prilikom njihovog punjenja. Peltier modul koristi se, naravno, i u rashladnim uređajima – mini hladnjacima, hladnjacima za vino, odvlaživačima zraka i manjim klima uređajima poput onih u automobilima gdje se, preusmjeravanjem hladnog zraka kojeg stvara Peltier pomoću ventilatora, sjedala hlade brže od klima uređaja cijele kabine, što omogućava i pojedinačno kontroliranje vozačevog i suvozačevog sjedala. Osim toga, posljednjih je godina porasla potražnja za tzv. nosivim klima uređajima - kako bi se spriječio toplinski udar, za hlađenje ljudskog tijela koriste se nosivi klima uređaji u odjeći koji koriste Peltier module. Nabrojane su samo neke od primjena Peltier modula te nije upitno kako će njegov daljnji razvoj omogućiti implementaciju ovog elementa u još više različitih sustava [30 – 34].

2.4.3. Prednosti i nedostaci Peltier modula

Jedna od glavnih prednosti Peltier modula jest njegov princip rada koji je u skladu sa ekološkim zahtjevima današnjice, kada sve više jača svijest o očuvanju prirode i atmosfere – za njegov rad nisu potrebna nikakva rashladna sredstva koja bi mogla oštetiti ozonski omotač, što ih čini ekološki prihvatljivima. Još neke od pozitivnih karakteristika koje bi se mogle izdvojiti jesu te da modul može biti vrlo malih dimenzija, lagan je, tih i ne proizvodi vibracije jer ne sadrži nikakve pokretne dijelove. Vrlo se lako instalira u bilo kakav sustav te je manje složen i lakši za zamjenu kada bi se usporedio sa kompresorskim rashladnim sustavima, ima

dug životni vijek te može raditi konstantno na dulje vremenske periode, što bi značilo da ne zahtijeva gotovo nikakvo održavanje. Vrlo koristan aspekt ovoga modula jest i taj što može služiti i kao grijaće sredstvo, obrne li mu se polaritet. Kontrolom struje može se postići visoka preciznost u kontroli temperature koju proizvodi modul, pa je lako napraviti automatski sustav upravljanja s funkcijama daljinskog, programskog ili računalnog upravljanja.

Kao glavni nedostatak Peltier modula najčešće se navodi njegova neučinkovitost. Električna struja u modulu djeluje kao rashladno sredstvo u ciklusu hlađenja te utječe na sposobnost „prebacivanja“ topline s jednog mjesta na drugo – međutim, dio snage potrebne za takvo prebacivanje gubi se zbog neizbježnih procesa pretvaranja struje u toplinu i rezultirajućeg gubitka topline na hladnoj strani. Kapacitet hlađenja stoga mora biti dovoljno velik da nadoknadi takav gubitak snage. U usporedbi sa kompresorskim rashladnim sustavima, čiji je kapacitet hlađenja otprilike dva puta veći od potrebnog rada, Peltier modul čini se neefikasnim. S obzirom na već spomenuto nastojanje struje da generira značajnu količinu topline, u većim primjenama to rezultira njezinom prekomjernom količinom, što obično zahtijeva korištenje dodatne opreme poput ventilatora. Također, zbog blizine hladne i tople strane modula, odnosno izazova učinkovitog prijenosa temperature od modula i do modula, osim ventilatora se često moraju koristiti i veliki hladnjaci, odnosno hladila. Nedostatak Peltier modula je i taj što se proces hlađenja, u usporedbi s kompresorskim rashladnim sustavima, odvija mnogo sporije, a ako dođe do prekomjernog hlađenja modula, kondenzacija može uzrokovati kratki spoj. Već spomenuta velika potrošnja energije koja rezultira visokim troškovima čini još jedan problem, kao i relativno visoki troškovi proizvodnje termoelektričnih materijala koji su dugo ograničavali širu primjenu Peltier modula. Ipak, kako se sve češće pronalaze i proizvode novi termoelektrični materijali, cijene sve više padaju i termoelektrični moduli primjenu pronalaze u sve više različitih sektora [25], [35 – 38].

2.4.4. Dosadašnja istraživanja rashladnih sustava s Peltier modulom upravljanih Arduinom

Istraživanjem i analizom dosadašnjih znanstvenih radova na temu rashladnih sustava koji koriste Peltier modul i koji su na neki način upravljani Arduinom, može se zaključiti kako je u samo nekoliko posljednjih godina porastao interes za proučavanjem upravo takvih sustava. Postoji mnogo znanstvenih radova te tematike, no navedeno će biti samo nekoliko njih kako bi se stekao općenit dojam o takvoj vrsti istraživanja i njihovim rezultatima. Jedno od tih

istraživanja provedeno je 2018. godine na Inženjersko – tehnološkome fakultetu Sveučilišta u Maleziji, a originalni naslov rada jest „Development of Portable Air Conditioning Using Peltier Effect for Small Area Uses“. Autori su se, kako sâm naslov odaje, bavili razvojem prijenosnog klima uređaja korištenjem Peltier modula za hlađenje manjih površina. Kako bi se osigurao dovoljan napon i ispravan rad Peltier modula, korišten je tzv. boost pretvarač koji povećava ulazni napon, a Arduino UNO u ovom slučaju kontrolira rad pretvarača koristeći modulaciju širine impulsa (eng. *PWM - Pulse Width Modulation*), koji omogućuje precizno podešavanje izlazne snage i osigurava stabilnost i kontrolirano slanje energije Peltier modulu. Na temelju otkrića ovog istraživanja, zaključeno je kako je integracija Arduina s boost pretvaračem uspješno provedena, a da temperatura na hladnoj strani Peltier modula doseže 23,6°C za 300 sekundi pri struji manjoj od 1 A. Kada se struja poveća, ista se temperatura postiže za manje od 240 sekundi. Zaključak istraživanja bio bi da je ovakav prijenosni klima uređaj učinkovit za hlađenje manjih površina veličine 50 cm x 50 cm, s temperaturom koja konstantno bilježi 23,6°C [39].

U drugome znanstvenom radu iz 2021. godine naslova „Design of Cooling and Heating Tool Using Thermoelectric Peltier Based on Arduino Uno“, provedenome u sklopu Sveučilišta u Indoneziji, ispitala se učinkovitost Peltier modula u stanju bez i s opterećenjem u improviziranome sustavu za hlađenje, odnosno grijanje. Kutija od stiropora veličine 40 cm x 20 cm x 32 cm podijeljena je na dva dijela, gdje jedan dio kutije služi za hlađenje koristeći hladnu stranu Peltier modula, a drugi dio, na koju djeluje topla strana Peltiera, služi za grijanje. Arduino UNO je u ovome projektu korišten za uključivanje i isključivanje Peltier modula i ventilatora. Kada primi odgovarajući signal od daljinskog upravljača putem infracrvenog prijemnika, Arduino aktivira relej, a aktivacija releja tada uključuje Peltier i ventilatore. Rezultati ovog istraživanja otkrili su kako sustav, bez dodatnog opterećenja, može postići temperaturu od 21,3°C na strani gdje Peltier modul hladi, te temperaturu od 80°C na strani gdje modul grije nakon 40 minuta korištenja pri naponu od 12 V i struji od 15 A. Kada se sustavu doda opterećenje, odnosno kada se u sustav stavi boca s tekućinom od 300 ml, sustav proizvodi temperaturu od 22,2°C, odnosno 70,7°C u istom vremenskom rasponu te pri jednakom naponu i struji. Autori ovoga rada zaključili su kako su ovakvi rashladni sustavi, temeljeni na korištenju termoelektrika, još uvijek manje učinkoviti od tradicionalnih kompresijskih hladnjaka [40].

Posljednji istraživački rad koji će biti opisan jest „Development of Ultra-Low Temperature Cooling System Based on Peltier Module“ iz 2023. godine, proveden na Tehničkom fakultetu

u Japanu. Autori rada smatraju kako je ključ postizanja najveće učinkovitosti rashladnog sustava odvođenje topline s tople strane Peltier modula te im je cilj bio postići temperaturu od -30°C , odnosno izraditi rashladni sustav ultraniske temperature korištenjem dvostupanjske metode hlađenja. Takva metoda podrazumijeva istovremeno korištenje dvaju Peltier modula koji su u bliskom kontaktu, na način da je hladna strana gornjeg modula u kontaktu sa spremnikom kojega se treba hladiti, dok se donji modul koristi za hlađenje grijaće strane gornjeg modula te oslobađa toplinu vanjskom metodom hlađenja, kao što su hlađenje zrakom ili vodom. Arduino je korišten za kontroliranje temperature unutar rashladnog uređaja. Rezultati istraživanja su pokazali kako temperatura, samo nekoliko minuta nakon paljenja sustava, pada puno brže u slučaju metode hlađenja vodom nego zrakom jer se toplina s tople strane modula mogla puno brže proširiti u vodi nego u zraku. Temperatura je stoga, u slučaju hlađenja s vodom, dosegla vrijednost od -38°C za 5 minuta. Ovim radom autori su potvrdili potencijal dvostupanjske metode hlađenja te potaknuli realizaciju prijenosnih uređaja za hlađenje ultraniskim temperaturama [41].

3. Izrada rashladnog sustava

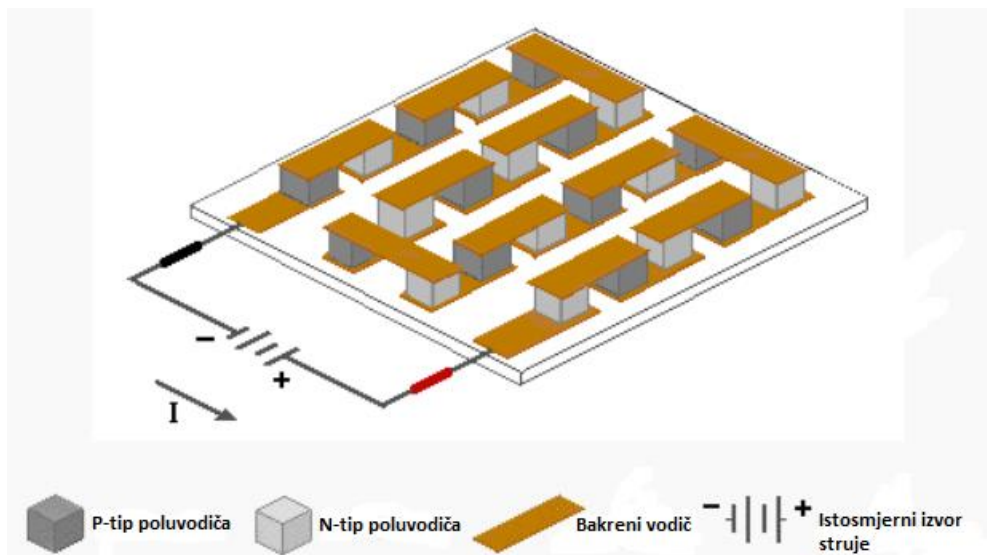
Razvoj prijenosnog rashladnog sustava koji koristi Peltier modul kao izvor hlađenja, a Arduino kao mikrokontroler koji upravlja tim modulom, bit će opisan kroz ovo poglavlje. Za početak će biti navedeni svi elementi korišteni pri izradi sustava, kao i njihova uloga u ovome konkretnom sustavu, a poseban naglasak će biti na principu rada Peltier modula. Svaka faza procesa izrade bit će opisana korak po korak, kao i alati koji su korišteni za obradu elemenata sustava.

3.1. Korišteni elementi

Dva elementa na kojima se temelji ovaj rashladni sustav jesu Peltier modul, koji služi kao rashladni element i Arduino mikrokontroler, korišten za upravljanje paljenja, odnosno gašenja cijelog sustava te za prikaz promjene temperature nakon određenog vremenskog intervala. Ostali elementi korišteni za izradu uključuju ventilatore s odgovarajućim zaštitnim rešetkama, hladnjake, PVC cijevi sa odgovarajućim poklopcima i spojkama, termalnu pastu, navojnu šipku te vijke i matice.

3.1.1. Peltier modul

Peltier element ili Peltier modul, elektronička je komponenta koja koristi termoelektrični efekt kako bi se postiglo hlađenje ili grijanje. Modul se sastoji od velikog broja poluvodiča P i N tipa, povezanih metalnim spojevima i poslaganih između dva sloja keramike u alternirajućem naizmjeničnom rasporedu. Niz parova poluvodiča električno su spojeni serijski, dok su termički raspoređeni paralelno (Slika 2) kako bi se maksimizirao učinak hlađenja, odnosno grijanja keramičkih površina [42], [43].

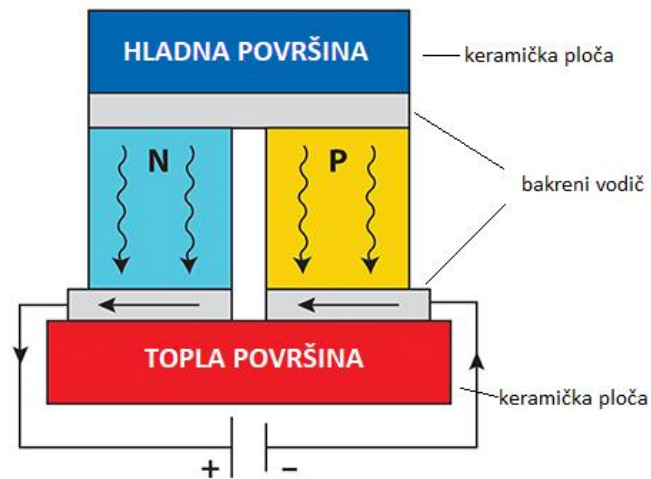


Slika 2 Presjek Peltier modula – prikaz načina spajanja poluvodiča

Keramičke ploče modula obično se izrađuju od aluminij – oksida, spojeva visoke toplinske vodljivosti koji pružaju dobru električnu izolaciju, dok se metalni spojevi uglavnom izrađuju od bakra koji je izvrstan vodič električne struje. Za izradu poluvodiča P–tipa i N–tipa najčešće se koristi legura bizmuta i telurida, no oba imaju različite gustoće slobodnih elektrona pri istoj temperaturi kako bi se postigao termoelektrični efekt, odnosno Peltierov efekt, na kojemu počiva princip rada ovakvih modula [44].

Kao što je već spomenuto, Peltierov efekt se očituje u činjenici da će protok struje kroz zatvoreni električni krug, sastavljen od dvaju različitih poluvodiča, rezultirati hlađenjem jednog kraja, a zagrijavanjem drugog kraja spoja. U vođenju struje kroz metal sudjeluju elektroni čija je energija bliska tzv. Fermijevoj energiji, dok u vođenju struje kroz poluvodič sudjeluju elektroni iz vodljive vrpce, što znači da vodljivi elektroni u poluvodiču imaju veću energiju od onih u vodiču, odnosno metalu [43]. Jedna od razlika između N i P tipa poluvodiča jest ta što kod N- tipa poluvodiča u prijenosu struje sudjeluju elektroni kojih je višak, dok u P–tipu poluvodiča to čine šupljine zbog manjka elektrona. Na slici (Slika 3) prikazan je osnovni izgled jednoga P-N spoja, odnosno osnovnog modula za hlađenje i grijanje od kojih je izgrađen Peltier modul. Elektroni se slobodno gibaju u bakrenom vodiču, no pri prijelazu iz metala u P–tip poluvodiča rekombiniraju se sa šupljinama te gube energiju u obliku topline. Razlog tomu je razlika u energetske razinama – elektroni u vodiču, odnosno bakru, na višoj su energetskej razini od šupljina poluvodiča te, kako bi popunili prazna mjesta na nižoj energetskej razini u kristalnoj strukturi poluvodiča, moraju izjednačiti energije i zato moraju otpustiti dio energije. Zatim, kako bi prešli iz P-tipa poluvodiča u bakreni vodič, elektroni trebaju skočiti na višu energetskej razinu; to čine apsorbirajući

energiju, odnosno uzimajući toplinsku energiju od kristalne rešetke. U bakrenom vodiču se elektroni kreću slobodno, a dolaskom na spoj s poluvodičem elektroni apsorbiraju energiju i čine taj dio poluvodiča hladnijim. To se događa jer je Fermijeva energetska razina vodiča, odnosno bakra, na nižoj energetskej razini od dna vodljivog pojasa poluvodiča, pa elektroni, kako bi prešli u vodljivi pojas poluvodiča N-tipa, moraju nadoknaditi razliku u energiji. S obzirom na to da se kroz poluvodič N-tipa elektroni kreću u vodljivom energetskej pojasu, dolaskom na drugi spoj s metalom, oni ponovno gube energiju u obliku topline te zagrijavaju taj dio jer su slobodni elektroni u vodljivom pojasu poluvodiča na višoj energetskej razini od Fermijeve razine metala. Promjenom smjera struje, odnosno promjenom polarizacije napona napajanja, površina modula koja je hladila postaje grijaća strana i obrnuto [43 - 45].



Slika 3 Osnovni modul za hlađenje/grijanje

U izradi prijenosnog rashladnog sustava u ovome diplomskom radu, Peltier modul služi kao izvor hlađenja, a ideja je da se zrak ohlađen modulom rasprši u prostor određene površine te ga tako hladi. Korišten je Peltier modul tipa TEC1-12706 prikazan na slici (Slika 4), dimenzija 40 x 40 x 3.6 mm za čiji je optimalan rad potreban napon od 12 V te radna struja od oko 6 A. Temperaturni raspon u kojemu modul može raditi jest -30°C do 70°C. U normalnim uvjetima rada vruća strana modula može postići temperaturu od 25°C do 50°C, dok je maksimalna temperaturna razlika koju modul može postići između svoje hladne i vruće strane 66°C do 75°C [46].



Slika 4 Izgled Peltier modula

Spajanjem crvene žice Peltier modula na pozitivnu elektrodu, a crne žice na negativnu elektrodu, opaženo je kako strana modula s oznakom modela grije, dok druga strana hladi. Zbog lakšeg razlikovanja hladne i vruće strane u kasnijoj uporabi, na modul je stavljena oznaka „H“ (eng. *hot*) koja obilježava toplu stranu, te oznaka „C“ (eng. *cold*) koja obilježava hladnu stranu modula kada se njegovi polovi spoje na elektrode jednakog polariteta.

3.1.2. Ostali korišteni elementi

Kao jedan od ključnih dijelova ovog rashladnog uređaja mogu se navesti PVC cijevi koje u ovom sustavu predstavljaju kanal za prenošenje hladnog, te odvođenje vrućeg zraka. PVC cijevi te odgovarajući poklopci i spojke od istog materijala – polivinil klorida – inače korištene za kućnu i uličnu kanalizaciju za odvodnju otpadnih voda, za ovaj projekt odabrane su zbog svojih povoljnih karakteristika, prvenstveno zbog otpornosti na visoke temperature do 90°C i dobrih izolacijskih svojstava. PVC cijevi pogodne su i jer se mogu lako obrađivati i rezati s pomoću standardnih alata poput pile za metal ili pile za plastiku, vijek trajanja im je vrlo dug te su široko dostupne u raznim oblicima, veličinama i debljinama. Za potrebe ovog rada, odabrana je PVC cijev 110, gdje brojka označava njezin promjer od 11 cm, te za takav promjer odgovarajući poklopci i klizne spojke.

Osim PVC elemenata, bitan dio ovog rashladnog uređaja čine i ventilatori, čija je uloga raspršivanje hladnoga zraka na jednome kraju cijevi, te hlađenje dijela uređaja na kojemu Peltier modul generira toplinu kako bi na strani modula koja hladi efekt hlađenja bio što veći. Korišteni ventilatori su marke Sunon, često korištenih u računalima, dimenzija 92 x 92 x 25 mm koji zahtijeva napajanje od 12 V, sa snagom od 3 W te protokom zraka od 49,2 m³/h.

Kako bi se spriječio kontakt bilo kakvih objekata s lopaticama ventilatora, odnosno kako bi se osigurao njegov nesmetani rad te zaštita korisnika, korištene su i prikladne zaštitne rešetke.

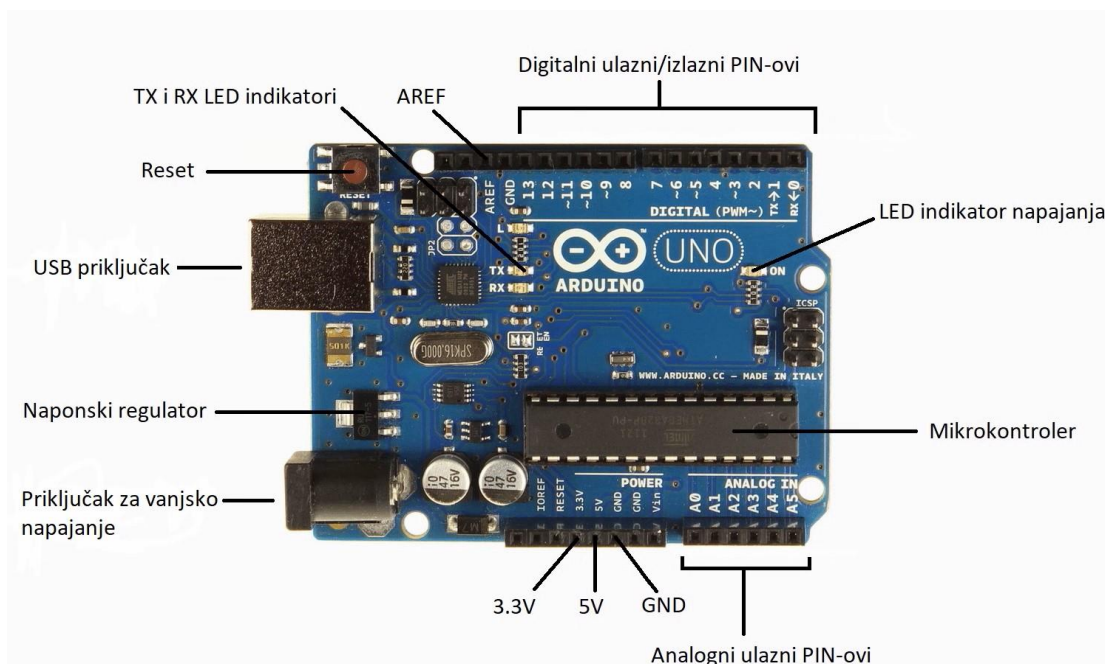
Za apsorpciju, odnosno odvođenje topline koju stvara vruća strana Peltier modula koristi se tzv. heatsink, odnosno hladilo ili hladnjak. Hladnjak je pasivni uređaj koji se uglavnom koristi za odvođenje topline s elektroničkih komponenata kako bi se održala njihova optimalna temperatura te spriječilo njihovo pregrijavanje [47]. Osim navedene funkcije koju hladnjak obavlja i u ovom uređaju, u kombinaciji s ventilatorom, poboljšava se učinkovitost hlađenja Peltier modula tako da ventilator povećava protok zraka preko hladnjaka na toploj strani kako bi se bolje raspršila toplina, što rezultira boljim hlađenjem modula. Hladnjak se, osim na toploj strani modula, u ovome uređaju koristi i na njegovoj hladnoj strani kako bi se hladnoća prenijela na što veću površinu te kasnije raspršila ventilatorom u neki prostor. Jedan od materijala od kojih se najčešće izrađuju hladnjaci jest aluminij, biran uglavnom zbog svoje dobre toplinske vodljivosti, a ovdje je korišten i zbog mogućnosti da se relativno lako oblikuje. Početne dimenzije korištenog hladnjaka su 160 x 150 x 40 mm, a on će se kasnije rezati kako bi se dimenzije prilagodile promjeru PVC cijevi u koju će hladnjaci biti smješteni.

Kako bi se osigurao dovoljan i brz prijenos termalne energije s Peltier modula na hladnjake, odnosno da bi se spriječilo pregrijavanje modula, između njihovih dodirnih površina nanošena je tzv. termalna pasta. Ona se uglavnom koristi u računalima, za prijenos topline između procesora i hladnjaka, upravo kako bi se maksimizirala dodirna površina dvaju elemenata, odnosno kako bi se popunile šupljine između dvaju elemenata te kako bi se stvorio zadovoljavajući prijenos topline [48]. Još neke od elemenata za izradu čine razni vijci, matice i oblikovane navojne šipke, korištene uglavnom za osiguravanje čvrstoće prijanjanja pojedinih dijelova uređaja.

3.1.3. Arduino

Arduino je elektronička open-source platforma, odnosno platforma otvorenog kôda namijenjena izradi elektroničkih projekata. Sastoji se od fizičke programabilne ploče, mikrokontrolera, koji čini hardverski dio, te softverskog dijela koji služi za pisanje i učitavanje računalnog kôda s računala na fizičku ploču [49]. Kao što je već napomenuto, kompletan sustav je open-source, što znači da je programski kôd otvoren svima za pregled i promjene, kao i dizajn hardvera kojega je moguće mijenjati i takvoga distribuirati [50].

Softverski, odnosno programski dio Arduina naziva se IDE (eng. *Integrated Development Environment*), a označava integrirano razvojno okruženje, dizajnirano kako bi se olakšao proces stvaranja programa uređivanjem izvornog koda, brzim uklanjanjem pogrešaka i sl. [51]. Arduino je vrlo jednostavan jer ne zahtijeva programator, poseban dio hardvera za učitavanje kôda na ploču korišten kod ostalih mikrokontrolera, već običan USB kabel kompatibilan s gotovo svim računalima. Prednost Arduina je i ta što koristi pojednostavljenu verziju programskog jezika C++. što olakšava učenje programiranja, a programirati se može koristeći bilo koji operacijski sustav [50]. S obzirom na to da je softver osmišljen tako da omogućuje jednostavan rad početnicima u programiranju, a dovoljno je fleksibilan da može podržati i kompleksnije projekte naprednijih korisnika, Arduino se koristi u raznim kontekstima – od manjih, jednostavnih školskih projekata pa sve do složenih znanstvenih instrumenata [52]. Kada je riječ o hardveru, postoji mnogo različitih vrsta Arduino pločica, no većina ih ima jednake osnovne dijelove; kao primjer je naveden Arduino Uno, a na slici su prikazane njegove osnovne komponente (Slika 5).



Slika 5 Osnovi dijelovi Arduino pločice

Svaka se Arduino pločica treba moći povezati na nekakav izvor napajanja, a to se uglavnom vrši USB kabelom spojenim iz računala na za to predviđen priključak na pločici ili običnim vanjskim, zidnim napajanjem na odgovarajući priključak za vanjsko napajanje. USB veza, osim za napajanje, služi i za prijenos programskog kôda na pločicu. Kao indikator da je Arduino opskrbljen strujom služi malena LED-ica koja bi trebala svijetliti svaki put kada se Arduino ispravno spoji na izvor napajanja, dok naponski regulator kontrolira količinu napona

koji se propušta na ploču. Na pločici se nalazi i reset tipka koja služi za resetiranje, odnosno ponovno pokretanje kôda učitano na Arduinu. Kao ključan dio pločice ističe se mikrokontroler koji je odgovoran za cjelokupno funkcioniranje Arduina – na sebe pohranjuje i izvršava programski kôd te omogućuje čitanje podataka s ulaznih pinova i slanje signala na izlazne pinove, omogućujući interakciju Arduina s vanjskim svijetom. Mikrokontroleri se razlikuju ovisno o vrsti Arduina, a uglavnom se koriste oni iz linije ATmega proizvedene od strane tvrtke Atmel. Kao indikator koji treperi kada mikrokontroler prima podatke služi LED-ica s oznakom RX (eng. *receive*), dok LED-ica oznake TX (eng. *transmit*) treperi kada mikrokontroler odašilje podatke. Mjesta na Arduinu na koja se spajaju vanjski uređaji i druge elektroničke komponente nazivaju se pinovi, a mogu se podijeliti na analogne, digitalne i ostale pinove. Digitalni pinovi označeni su brojkama od 0 do 13 i mogu se koristiti kao digitalni ulazi ili izlazi. Na primjer, mogu se koristiti kao digitalni ulazi koji detektiraju je li spojena tipka pritisnuta ili kao digitalni izlazi za napajanje LED-ice. Neki digitalni pinovi označeni su tildom (~), što znači da se, osim digitalnih signala, s pomoću njih mogu generirati i analogni signali i na taj način simulirati analogni izlazi. Analogni pinovi, odnosno analogni ulazi koriste se za očitavanje signala s analognih senzora, poput senzora temperature, te ih pretvaraju u digitalne vrijednosti koje se mogu očitati. Kao izvori istosmjernog napajanja vanjskih uređaja ili senzora, ovisno o količini struje koju zahtijevaju, mogu se koristiti pinovi označeni s 5 V ili 3.3 V. Oba izlaza pružaju uglavnom jako male količine struje, pa tako izlazna struja pina od 5 V obično ne prelazi 400 mA. Pin s oznakom GND označava „ground“ ili „zemlju“, a predstavlja negativan pol istosmjernog napajanja te se koristi za uzemljenje strujnog kruga. Iskusniji korisnici Arduina ponekad upotrebljavaju pin AREF, što predstavlja „analog reference“, odnosno referentni analogni napon za usporedbu napona pri analognim mjerenjima [49], [50].

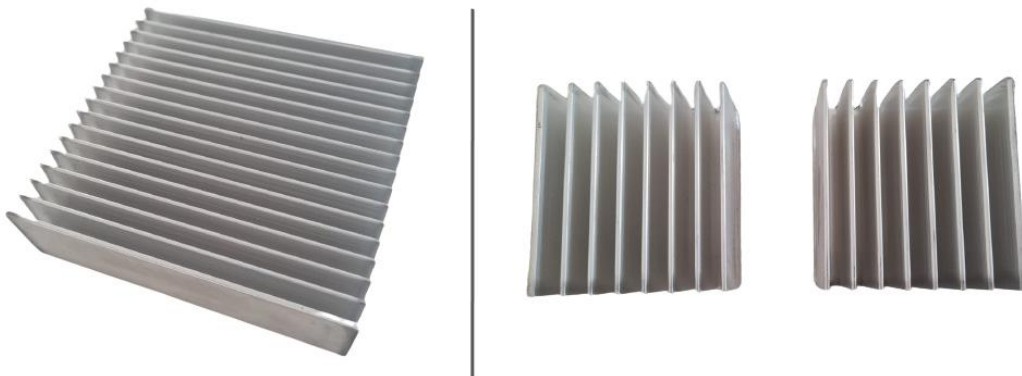
U ovome rashladnom sustavu korištena je jedna od nekoliko hrvatskih inačica Arduino pločica naziva Croduino Basic3. Pločica je veličine 3 x 5 cm i sadrži 8 analognih ulaza te 14 digitalnih ulaza, odnosno izlaza. Mikrokontroler koji koristi jest Atmelov ATmega328, dok za USB komunikaciju koristi CH340 serijski čip. Croduino Basic3 posjeduje 32 kB Flash memorije za pohranu programa koji se izvode, te 2 kB radne, RAM memorije [53]. Njegova funkcija u sustavu jest da, u kombinaciji s relejem, omogući paljenje i gašenje cijelog sustava te praćenje promjene temperature prostorije u kojoj se odvija mjerenje i temperature prostora određene površine koji se pokušava rashladiti.

3.2. Izrada uređaja

U nastavku će biti pružen detaljan prikaz procesa konstrukcije rashladnog uređaja, uključujući pregled korištenih alata za obradu, postupak obrade određenih elemenata sustava te način na koji su elementi povezani u funkcionalnu cjelinu. Bit će prikazan konačan izgled uređaja te detaljno objašnjen njegov princip rada, no bez Arduino upravljanja.

3.2.1. Obrada elemenata i korišteni alati

Prije spajanja svih dijelova u cjelinu, određeni su elementi zahtijevali neku vrstu obrade. Jedan od takvih elemenata bio je hladnjak, odnosno hladilo, čije početne dimenzije od 160 x 150 x 40 mm nisu odgovarale promjeru cijevi u koju će biti postavljen. Uređaj zahtijeva dva hladnjaka, po jedan za svaku stranu Peltier modula, pa je korištenjem brusilice za rezanje metala hladnjak presječen kako bi se dobila dva komada. Svaki komad sada je veličine 80 x 75 x 40 mm, dok su svi oštri rubovi istom brusilicom obrađeni iz sigurnosnih mjera (Slika 7).



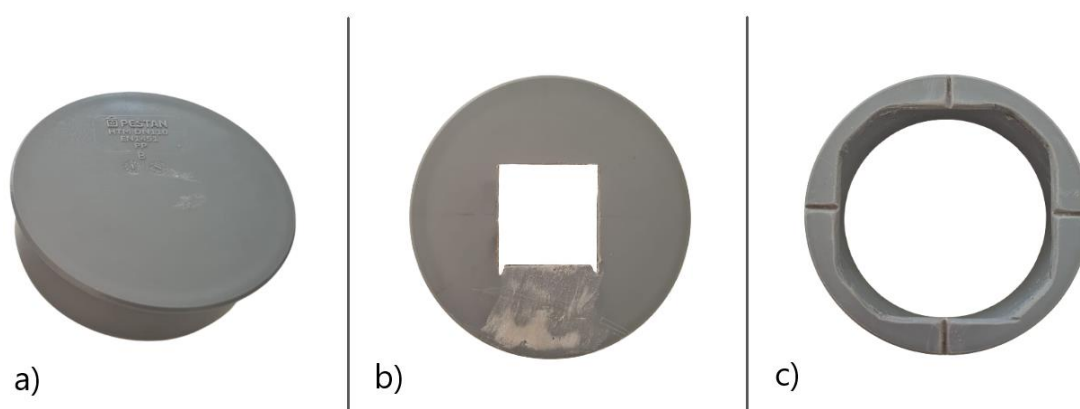
Slika 6 Hladnjak - prije i nakon obrade

Osim hladnjaka, dijelovi koji su zahtijevali prilagodbu bili su ventilatori čije je rubove bilo potrebno skratiti i zaobliti kako bi se mogli utisnuti u poklopac cijevi. Nakon što su izmjereni i označeni, plastični dijelovi ventilatora koje je bilo potrebno odstraniti odrezani su ubodnom pilom, a njegovi grubi rubovi izbrušeni su brusnim papirom. Dimenzija ventilatora, odnosno njegov oblik sada je takav da čvrsto uliježe u poklopac cijevi (Slika 7).



Slika 7 Ventilator - prije i nakon obrade

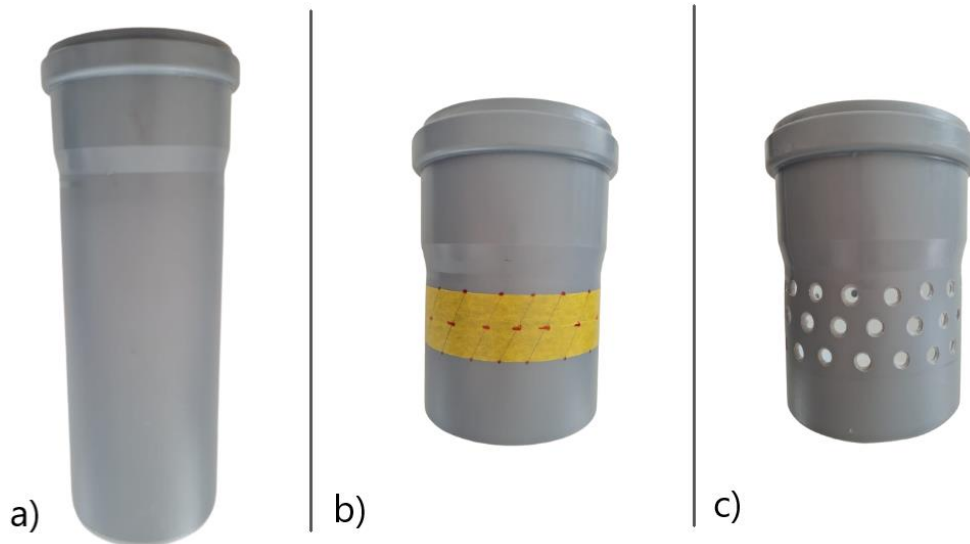
Ravnu plohu poklopca cijevi (Slika 8. a) bilo je potrebno isjeći u takvome obliku da zrak koji se nalazi u cijevi može prolaziti isključivo kroz ventilator. Stoga su dva poklopca, po jedan za svaki ventilator, ubodnom pilom izdubljena tako da ne zakrivaju lopatice ventilatora, a da sve šupljine između ventilatora i stijenke cijevi ostanu popunjene. U svaki su poklopac brusilicom urezana po četiri kanala kako bi se rešetke za ventilatore, koje će biti postavljene na poklopce, mogle bolje utisnuti (Slika 8. c). U treći je poklopac ubodnom pilom izdubljen oblik dimenzija 40 x 40 mm u koju će biti postavljen Peltier modul, te dva manja proreza na dnu za žice modula (Slika 8. b). Ovaj element odvajat će prostore na koje djeluju hladna i vruća strana modula, odnosno služiti će kao barijera koja sprječava protok zraka iz jedne strane cijevi u drugu. Oštri rubovi navedenih elemenata obrađeni su i izbrušeni su brusilicom te brusnim papirom.



Slika 8 Poklopac cijevi - prije (a) i nakon (b), (c) obrade

Prije spajanja svih elemenata u cjelinu, potrebno je bilo obraditi i dvije PVC cijevi (Slika 9. a) čije su početne duljine od 250 mm brusilicom skraćene na duljinu od 160 mm, dok su grubi ostaci na rubovima uklonjeni brusnim papirom. Na cijevima su označeni položaji rupa kroz

koje će zrak ulaziti u cijev (Slika 9. b), a rupe su zatim izbušene bušilicom. Za bušenje rupa na jednoj cijevi korišteno je svrdlo promjera 5 mm, dok je za bušenje rupa na drugoj cijevi korišteno svrdlo promjera 8 mm. Naposljetku, sve su rupe dodatno obrađene konusnim svrdlom (Slika 9. c).



Slika 9 Cijev - prije (a) i nakon (b), (c) obrade

Nakon obrade i prilagodbe pojedinih elemenata očekivanom izgledu sustava te nakon ispitivanja ispravnosti elektroničkih komponenti koje će biti korištene, uslijedio je proces njihovog spajanja i stvaranja funkcionalnog rashladnog uređaja.

3.2.2. Konstrukcija uređaja i njegov princip rada

Povezivanje svih elemenata u cjelinu posljednja je faza izrade rashladnog uređaja, a ključan korak bio je formiranje središnjeg dijela uređaja u kojem će biti smješten Peltier modul, temeljni element cijelog sustava. Peltier modul je stoga postavljen u prethodno obrađeni poklopac cijevi, u čiju su ravnu plohu urezana dva kanala za žice modula kako bi površine hladnjaka i modula maksimalno prijanjale jedna uz drugu. Na istoj su plohi izbušena dva otvora kroz koje će biti provučene žice modula i ventilatora s jedne strane uređaja na drugu. Stijenka drugog poklopca, čija je ravna ploha u potpunosti odstranjena, trenutnim je ljepilom pričvršćena za poklopac s modulom kako bi se na nju mogla navući odgovarajuća cijev. Na obje strane Peltier modula zatim je nanesen sloj termalne paste radi bržeg i ravnomjernijeg prijenosa topline na hladnjake, te što boljeg prijanjanja površina hladnjaka i modula (Slika 10).



Slika 10 Spajanje središnjeg dijela uređaja

Nakon što su obje strane Peltier modula premazane termalnom pastom, hladnjake je bilo potrebno čvrsto fiksirati kako ne bi bilo praznina između njihovih površina i površina modula. Kako se hladila pod utjecajem topline koju proizvodi modul ne bi odvojila od plastične površine poklopca, umjesto ljepila korištena je navojna šipka savijena u oblik slova „U“. Savijeni krajevi šipke provučeni su kroz rupe probušene u plastici poklopca, a šipka je sa druge strane osigurana i zategnuta odgovarajućim vijcima (Slika 11). Ovakav proces ponovljen je dva puta, po jednom za svaki hladnjak.



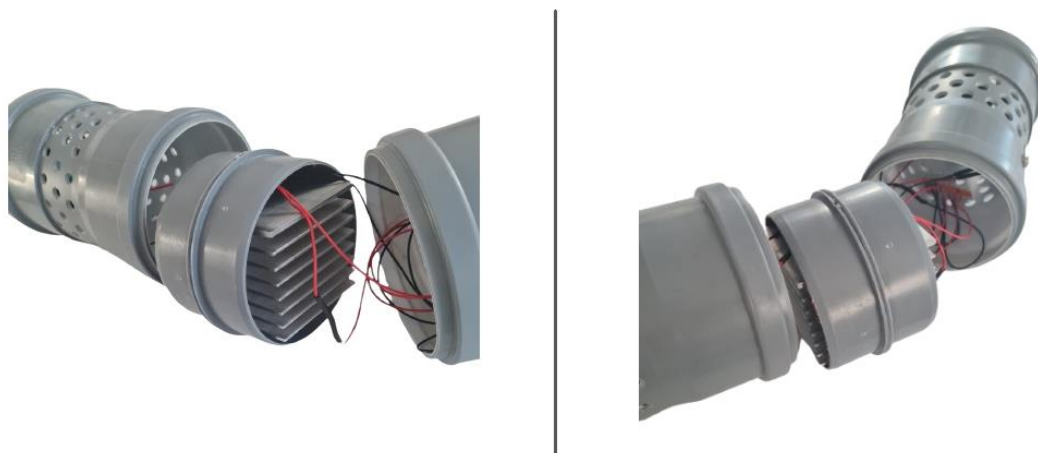
Slika 11 Fiksiranje hladnjaka navojnom šipkom

Dva jednaka ventilatora utisnuta su u jednake, već obrađene poklopce koji će biti postavljeni na samim krajevima cijevi, a oba ventilatora postavljena su tako da pušu prema unutrašnosti. Ventilator na kraju cijevi, na strani na kojoj Peltier modul hladi, raspršuje ohlađeni zrak, dok drugi ventilator pokušava ohladiti hladnjak koji apsorbira toplinu grijaće strane modula. Na svaki su poklopac u prethodno urezane kanale postavljene zaštitne rešetke za ventilatore, dodatno učvršćene trenutnim ljepilom.



Slika 12 Spajanje poklopca cijevi s ventilatorom i zaštitnom rešetkom

Sastavljanju svih navedenih komponenti u cjelinu prethodilo je povezivanje žica onih elemenata sustava koji za rad zahtijevaju električno napajanje. Nakon što su sve žice provučene do rashladne strane uređaja kroz otvore u središnjem dijelu, spojene su tzv. spojnicama ili stezaljkama za žice (Slika 13). Crvene žice dvaju ventilatora, Peltier modula te žica koja će služiti kao veza za vanjsko napajanje spojene na jednu stezaljku, dok su sve crne žice spojene na drugu stezaljku. Po jedna crvena i crna žica, koje će biti spojene na vanjsko napajanje, provučene su van cijevi kroz dodatno probušeni otvor.



Slika 13 Provođenje i spajanje žica uređaja

Posljednji korak u konstrukciji uređaja jest sklapanje svih dijelova u kompaktnu cjelinu. Sve komponente već su međusobno spojene žicama te je potrebno tek postaviti poklopce s ventilatorima na krajeve cijevi, a zatim svaku cijev spojiti na središnji dio. Cijevi su za središnji dio dodatno pričvršćene manjim vijcima kako bi se spriječila moguća odvajanja elemenata (Slika 14). Vijci se lako mogu odvrnuti odvijačem kako bi se uređaj mogao rastaviti u slučaju potrebe za određenim modifikacijama.



Slika 14 Konačan izgled rashladnog uređaja

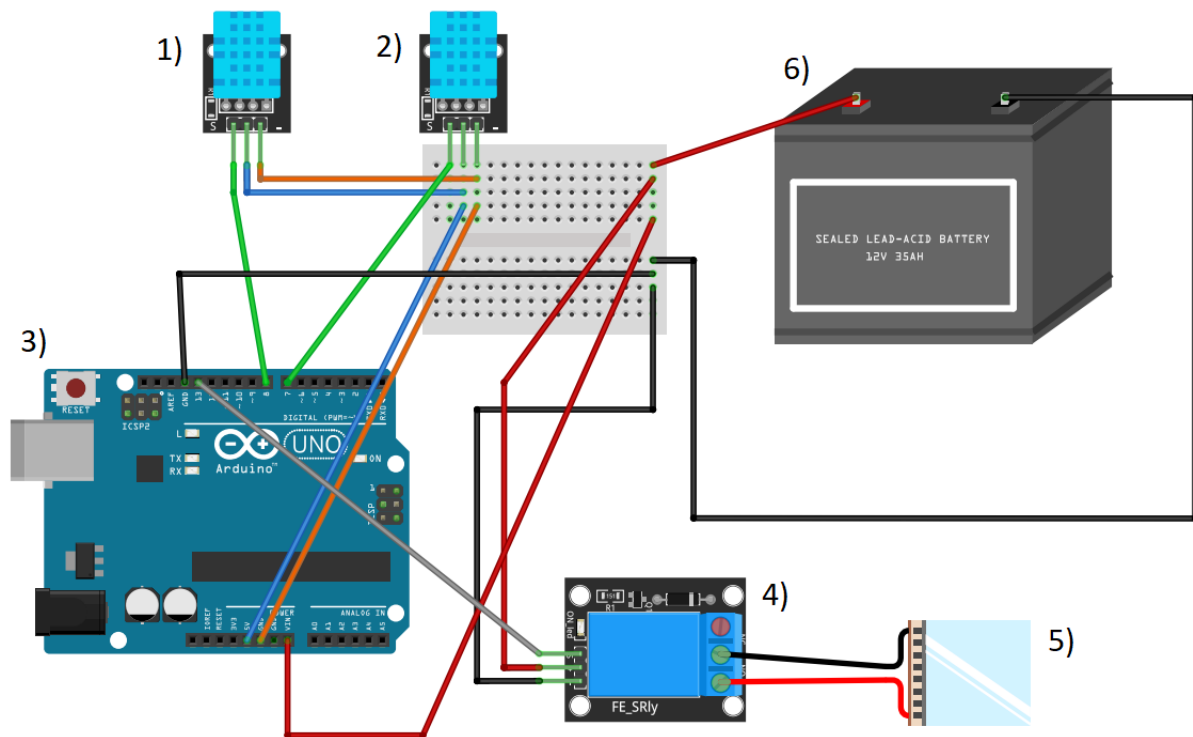
Spajanjem žica na strujni izvor, sve elektroničke komponente uređaja se pokreću te počinje proces hlađenja. Razlika u temperaturama dviju strana Peltier modula s vremenom raste, a istovremeno se jedan od hladnjaka zagrijava apsorbirajući toplinu, dok temperatura drugog hladnjaka pada pod utjecajem hladne strane modula. Na krajevima cijevi nalaze se ventilatori te su oba okrenuta prema unutrašnjosti cijevi, usmjeravajući zrak prema hladnjacima. Jedan od ventilatora, usmjeren prema hladnoj strani modula, raspršuje ohlađeni zrak s hladnjaka kroz rupice cijevi, hladeći okolni prostor. Drugi ventilator, okrenut prema hladnjaku toplije strane modula, prema njemu usmjerava zrak s ciljem njegova hlađenja. Nadolazeća faza razvoja sustava jest integracija uređaja s Arduinoom te stvaranje programskog rješenja za upravljanje, precizniju kontrolu te praćenje rada i učinkovitosti sustava.

4. Razvoj rashladnog sustava

U suvremenom dobu automatizacije, tehnološka rješenja poput Arduino platforme sve su češća te se zbog svoje jednostavnosti često koriste kao alat za upravljanje sustavima. Kako bi se izbjegla potreba za manualnim paljenjem i gašenjem prethodno izrađenog rashladnog uređaja, Arduino je odabran kao sofisticiranije rješenje za takvo upravljanje. Praćenje promjena temperature prostora kojega je potrebno rashladiti ključno je za procjenu učinkovitosti uređaja, stoga Arduino obavlja dodatne funkcije u radu ovog sustava – analiziranje podataka dobivenih sa senzora temperature te prikaz vrijednosti temperatura kroz određeni period.

4.1. Povezivanje rashladnog uređaja s Arduino pločicom

Ispravno fizičko povezivanje rashladnog uređaja s Arduino pločicom te drugim komponentama potrebnim za postizanje određenih performansi sustava, ključno je za ostvarenje njegovog pouzdanog i očekivanog rada te željenih rezultata. Nepravilno spajanje može rezultirati kratkim spojevima, preopterećenjem komponenti te oštećenjem cijelog sustava, stoga je bitno da svaki dio bude spajan poštujući polaritete te prema specifikacijama proizvođača. Kako bi se jasno i detaljno prikazala električna shema, odnosno sve komponente te električne veze među njima, korišten je open-source softver Fritzing koji omogućuje crtanje električnih shema, izradu PCB dizajna te virtualno prototipiranje elektroničkih projekata. Ovakav alat koristan je za planiranje i dokumentiranje projekata, provjeravanje funkcionalnosti njihovih dizajna te provjeru električnih veza [54]. Virtualni prikaz komponenti i njihovih električnih veza na slici reprezentira stvarne, fizičke komponente i način na koje su međusobno spajane u realnosti (Slika 15).



Slika 15 Shema strujnoga kruga u Fritzing softveru

Proces spajanja komponenti započeo je njihovom analizom i planiranjem redoslijeda povezivanja kako bi se postigao optimalan prototip električnog sklopa, a kako bi veze sklopa bile jasnije i preglednije, kao pomoć pri spajanju korištena je eksperimentalna pločica. Spajanjem komponenti u isti stupac na pločici formira se električna veza među njima, bez obzira na redak u kojemu se nalaze. Zbog svoje jednostavnosti, eksperimentalna pločica je, osim u virtualnom prikazu, korištena i u stvarnoj, fizičkoj konstrukciji sustava.

Kao početni korak u procesu povezivanja komponenti odabrano je uspostavljanje veze između dva senzora temperature i Arduino pločice. Na svakome od temperaturnih senzora, koji su na slici označeni brojevima 1 i 2, nalaze se po tri pina, tj. priključka – signalni, VCC te GND priključak. Signalni pin predstavlja digitalni izlaz, odnosno priključak za digitalni signal kojega sensor šalje Arduino pločici, označenoj brojem 3 na slici. Signalni su pinovi stoga povezani s digitalnim pinovima 7 i 8 na Arduino, dok su veze među njima prikazane zelenom bojom. Pin s oznakom VCC (eng. *Voltage Common Collector*) koristi se kao priključak za napajanje senzora, pa su VCC pinovi i jednog i drugog senzora, žicama označenima plavom bojom, spojeni s pinom oznake 5V na Arduino pločici, koji predstavlja napon od 5 volta. Uzemljenje senzora osigurano je spajanjem GND (eng. *ground*) pina dvaju senzora s GND pinom na Arduino, a veza je na slici prikazana narančastom bojom.

Nakon uspostave svih veza potrebnih za rad senzora, sljedeća faza bila je integracija releja u sklop, označenoga brojem 4 na slici. Relej, kao i senzor temperature, sadrži signalni pin pomoću kojega se dovodi kontrolni signal koji aktivira ili deaktivira relej. Signalni pin releja tako je povezan s digitalnim pinom 13 na Arduinu, a njihova je veza na slici prikazana sivom bojom. Neposredno ispod signalnog pina na releju nalazi se VCC pin koji je crvenom žicom povezan s eksperimentalnom pločicom, dok je u isti stupac na pločici spojen VIN pin Arduina. VIN (eng. *Voltage IN*) pin je ulazni pin koji se koristi za napajanje pločice putem vanjskog izvora napajanja, čiji će pozitivni priključak kasnije biti spojen u isti stupac na eksperimentalnoj pločici. Spojevi GND pinova releja i Arduina, prikazani crnim linijama, ostvareni su u novome, zasebnom stupcu eksperimentalne pločice, u koji će kasnije biti doveden negativni priključak vanjskog izvora napajanja. Svaki relej, osim pinova, sadrži metalne dijelove koji se fizički dodiruju ili razdvajaju kako bi prekinuli ili uspostavili električnu vezu, a nazivaju se kontakti. Kontakti se koriste za povezivanje releja s vanjskim električnim uređajima i omogućuju kontrolu strujnih krugova preko mikrokontrolera poput Arduina. Kako relej u ovome sustavu ima ulogu prekidača za paljenje, odnosno gašenje rashladnog uređaja, na njegove kontakte spojen je Peltier modul koji, na virtualnom prikazu sustava pod brojem 5, predstavlja sve elektroničke komponente stvarnog fizičkog uređaja, odnosno spoj Peltier modula i ventilatora. Crvena žica Peltier modula spojena je na NO (eng. *Normally Open*) priključak releja koji je normalno otvoren što znači da je, kada je u osnovnome položaju, odnosno kada relej nije aktiviran, kontakt između NO i COM (eng. *Common*) priključaka otvoren te struja tada ne teče. Kada se relej aktivira primjenom kontrolnog signala, kontakt između COM i NO priključaka se zatvara te struja između njih teče. Na COM priključak stoga je povezana druga, crna žica Peltier modula kako bi se uspostavila kontrola releja nad njegovim radom.

Posljednji korak u izradi električnog sklopa bilo je spajanje vanjskog naponskog izvora, pri čemu baterija napona 12 V, na slici označena brojem 4, simulira DC izvor napajanja korišten pri stvarnoj, fizičkoj konstrukciji sustava. Pozitivni priključak baterije spojen je na eksperimentalnu pločicu, u isti stupac kao i VCC pin releja te VIN pin Arduina, dok je u stupac s GND pinovima releja i Arduina doveden njezin negativni priključak. Uspostavljanjem električnih veza među svim komponentama završena je jedna od faza razvoja rashladnog sustava, dok će ispravnost tih veza biti ključna za stabilnost protoka struje te pouzdanu izvedbu sustava.

4.2. Programski kôd

Posljednji dio razvojnog procesa jest kreiranje programskog kôda koji će omogućiti koordinaciju i kontrolu nad svim fizički spojenim komponentama. Programski kôd treba sadržavati naredbe za upravljanje radom svih elektroničkih komponenti rashladnog uređaja te poseban dio za interpretaciju podataka s dvaju senzora temperature, odnosno očitavanje njihovih vrijednosti. Prvi korak u izradi programa jest izrada novog projekta u aplikaciji Arduino IDE, nakon čega je potrebno uključiti sve biblioteke koje će biti potrebne za rad s komponentama. Naredbom `#include <DHTesp.h>` tako je uključena biblioteka koja omogućuje rad s DHT (eng. *Digital Humidity and Temperature*) sensorima, odnosno sensorima temperature i vlažnosti, nakon čega su definirana tri različita pina Arduino pločice koja će se koristiti. Pin definiran kao `const int relejPin = 13` označava pin korišten za upravljanje relejem, odnosno prekidačem, dok se linijama `const int pinDHT1 = 7` i `const int pinDHT2 = 8` definiraju pinovi za povezivanje dvaju senzora temperature. Linija kôda `DHTesp dht1, dht2` predstavlja inicijalizaciju dviju instanci `dht1` i `dht2` klase `DHTesp`, odnosno stvaranje dvaju objekata koji će biti korišteni za komunikaciju s dvama sensorima. Navedeni objekti omogućit će programu da jednostavno pristupi funkcijama za očitavanje temperature sa senzora temperature. Unutar `setup()` funkcije postavlja se početno stanje pinova, pa se tako linijom `pinMode(relejPin, OUTPUT)` pin na kojemu se nalazi relej koji će služiti za upravljanje uređajem postavlja kao izlazni. Linijom `digitalWrite(relejPin, HIGH)` početno stanje na pinu `relejPin` postavlja se na vrijednost `HIGH`, što znači da će uređaj upravljan relejem biti ugašen sve dok vrijednost pina ne bude promijenjena. Nakon inicijalizacije standardne serijske komunikacije s brzinom od 9600 bitova po sekundi linijom `Serial.begin(9600)`, linijama `dht1.setup(pinDHT1, DHTesp::DHT11)` i `dht2.setup(pinDHT2, DHTesp::DHT11)` inicijaliziraju se senzori temperature `dht1` i `dht2` na odgovarajućim fizičkim pinovima `pinDHT1` i `pinDHT2` koristeći DHT11 tip senzora. Ovakva inicijalizacija omogućuje Arduinu da čita podatke o temperaturi koju zabilježe senzori (Slika 15).

```

1  #include <DHTesp.h>
2
3  const int relejPin = 13;
4  const int pinDHT1 = 7;
5  const int pinDHT2 = 8;
6
7  DHTesp dht1, dht2;
8
9  void setup() {
10     pinMode(relejPin, OUTPUT);
11
12     digitalWrite(relejPin, HIGH);
13
14     Serial.begin(9600);
15     dht1.setup(pinDHT1, DHTesp::DHT11);
16     dht2.setup(pinDHT2, DHTesp::DHT11);
17 }

```

Slika 16 Inicijalizacija senzora

Funkcija *loop()* glavna je petlja u programskome kôdu koja će se neprestano izvršavati, a unutar koje se linijom *if (Serial.available() > 0)* provjerava dostupnost serijskog ulaza, odnosno dostupnost podatka kojeg unosi korisnik preko serijske veze. Ako je broj dostupnih bajtova za čitanje veći od nule, podaci su primljeni serijskom vezom te ih je potrebno obraditi, dok se pročitani podaci pohranjuju u varijablu *naredba*. Nakon što su podaci pročitani, provjerava se njihova vrijednost; ako je primljena vrijednost 0, korisnik je poslao zahtjev za isključivanjem sustava te se izlaz releja postavlja na vrijednost *HIGH* funkcijom *digitalWrite(relejPin, HIGH)*, a zatim se putem serijske veze ispisiuje poruka „Sustav OFF“. Ako je primljena vrijednost 1, korisnik je poslao zahtjev za uključivanjem sustava, pa se izlaz releja postavlja na vrijednost *LOW*, nakon čega se ispisiuje poruka „Sustav ON“ (Slika 16).

```

19 void loop() {
20     if (Serial.available() > 0) {
21
22         char naredba = Serial.read();
23
24         if (naredba == '0') {
25             digitalWrite(relejPin, HIGH);
26             Serial.println("Sustav OFF");
27         } else if (naredba == '1') {
28             digitalWrite(relejPin, LOW);
29             Serial.println("Sustav ON");
30         }
31     }

```

Slika 17 Implementacija naredbi za upravljanje sustavom

Unutar `loop()` funkcije smješten je i dio kôda koji se odnosi na mjerenje temperature dvama sensorima te ispis izmjerenih vrijednosti. Metoda `getTemperature()` za mjerenje, odnosno dohvaćanje temperature sa senzora poziva se nad objektima `dht1` i `dht2`, a rezultati mjerenja se pohranjuju u varijable `temperatura1` i `temperatura2`. Linijom kôda `if(!isnan(temperatura1))` provjerava se ispravnost vrijednosti temperature koju je očitao senzor unutar prostora koji se hladi, odnosno ispituje se je li očitana vrijednost broj argumentom `isnan` (eng. *Not a Number*). Ako se navedeni uvjet o valjanosti temperature ispuni, kôd unutar `if` bloka se izvršava te se ispisuje poruka „Unutarnja temperatura“, kao i izmjerena vrijednosti temperature u Celzijevim stupnjevima. U slučaju da uvjet nije ispunjen, javlja se poruka kako nema podataka o temperaturi. Na jednak se način odvija mjerenje i ispis vanjske temperature čija je vrijednost pohranjena u varijabli `temperatura2`. Na samome kraju funkcije `loop()` nalazi se `delay(5000)` funkcija koja zaustavlja izvršavanje programa na 5000 milisekundi, odnosno 5 sekundi prije nego se petlja ponovno izvrši, što osigurava periodično mjerenje i ispisivanje temperature sa određenim vremenskim intervalom (Slika 17).

```
33     float temperatura1 = dht1.getTemperature();
34     float temperatura2 = dht2.getTemperature();
35
36     // Senzor temperature unutar kutije
37     if (!isnan(temperatura1)) {
38         Serial.print("Unutarnja temperatura: ");
39         Serial.print(temperatura1);
40         Serial.println(" °C");
41     } else {
42         Serial.println("Nema podataka o unutarnjoj temperaturi.");
43     }
44
45     // Senzor temperature van kutije
46     if (!isnan(temperatura2)) {
47         Serial.print("Vanjska temperatura: ");
48         Serial.print(temperatura2);
49         Serial.println(" °C");
50     } else {
51         Serial.println("Nema podataka o vanjskoj temperaturi.");
52     }
53
54     delay(5000);
55 }
```

Slika 18 Mjerenje temperature i ispis izmjerenih vrijednosti

Kreiranjem programskog kôda završena je posljednja faza razvoja rashladnog sustava te je tako omogućeno upravljanje cijelim sustavom jednostavnim naredbama, kao i efikasno praćenje promjena u vrijednostima temperature. Kako bi se ispitala i dokazala učinkovitost rashladnog sustava, potrebno je pokrenuti cijeli sustav, kontinuirano pratiti njegovog rad te zabilježiti i analizirati dobivene rezultate.

5. Testiranje funkcionalnosti sustava

Proučavanje i testiranje rada rashladnog uređaja neophodan je korak u procesu razvoja sustava jer omogućuje dublje razumijevanje njegovih performansi u određenim radnim uvjetima te ispituje njegovu pouzdanost, efikasnost i usklađenost s postavljenim standardima i očekivanjima. Praćenjem rada uređaja moguće je identificirati njegove eventualne nedostatke, što je ključno za daljnja poboljšanja i optimizaciju njegove izvedbe. U ovome poglavlju bit će opisana metodologija testiranja i dobiveni rezultati koji će se interpretirati i analizirati s ciljem evaluacije ukupne učinkovitosti rashladnog sustava.

5.1. Uvjeti testiranja i očekivanja

Testiranje rada i učinkovitosti rashladnog uređaja provedeno je u laboratoriju iz elektrotehnike uz korištenje profesionalne opreme te u nazočnosti stručne osobe koja je nadzirala sve faze testiranja. Kako bi se postigli kontrolirani uvjeti testiranja te izolacija od potencijalnih vanjskih utjecaja, rashladni kraj uređaja postavljen je u zatvorenu kutiju od stiropora koji se koristi kao izolator, što je omogućilo preciznije mjerenje performansi uređaja (Slika 19). Dimenzije kutije od stiropora su 48 x 36 x 36 cm s debljinom stijenki od 5 cm, pa je unutrašnjost koja će se hladiti površine 0,5304 m², odnosno volumena 25 688 cm³ ili 25,69 L. Jedan od temperaturnih senzora postavljen je van kutije kako bi bilježio temperaturu okoline te njezine potencijalne promjene, dok je drugi senzor postavljen unutar kutije kako bi se pratila oscilacija temperature unutar tog zadanog volumena. Svi sensorima prikupljeni podaci bit će prikazani na serijskom monitoru Arduino IDE-a. Nakon posljednje provjere ispravnosti svih električnih veza, sustav je spojen na DC izvor napajanja na kojemu je prethodno podešena struja od 2,6 A te napon od 8 V koji će sustavu osigurati stabilno napajanje.



Slika 19 Izgled postavljenog sustava za testiranje

Očekuje se da će rashladni uređaj smanjiti temperaturu unutar kutije volumena 25,7 L za najmanje 10°C u vremenskome roku od 45 minuta. Predviđeno smanjenje od 10°C odabrano je kao cilj jer bi takav pad temperature bio dovoljno značajan za postizanje željenog efekta hlađenja unutar kutije, stvarajući optimalno okruženje za određene primjene. Svi podaci prikupljeni tijekom mjerenja, uključujući promjene temperature i vrijeme hlađenja, pažljivo su bilježeni, dok će se analizom prikupljenih vrijednosti donijeti procjena o kvaliteti rada i ukupnoj učinkovitosti uređaja.

5.2. Rezultati testiranja

Nakon pokretanja rashladnog sustava, započeto je praćenje temperature okoline i temperature unutar kutije, kao i njegovog rada, tijekom perioda od 45 minuta. Iznosi temperatura očitani sa senzora, prikazani na serijskom monitoru Arduino IDE-a te bilježeni u intervalima od 5 minuta kako bi se dokazale predviđene oscilacije, navedeni su u tablici ispod (Tablica 1).

| Vrijeme (minute) | Vanjska temperatura (°C) | Unutarnja temperatura (°C) |
|------------------|--------------------------|----------------------------|
| 0 | 23,2 | 23,2 |
| 5 | 23,1 | 22,7 |
| 10 | 22,6 | 22,3 |
| 15 | 22,6 | 21,8 |
| 20 | 22,5 | 21,2 |
| 25 | 22,5 | 20,7 |
| 30 | 22,5 | 20,2 |
| 35 | 22,5 | 19,9 |
| 45 | 22,5 | 19,4 |

Tablica 1 Promjene vanjske i unutarnje temperature

Na samome početku testiranja, temperatura unutar kutije iznosila je 23,2°C, što je odgovaralo vanjskoj temperaturi, odnosno temperaturi okoline. Nakon 5 minuta, unutarnja temperatura smanjila se na vrijednost od 22,7°C, dok je vanjska temperatura ostala relativno konstantna na 23,1°C. U narednih 10 minuta, unutarnja temperatura nastavila je padati, dosegnuvši 21,8°C, dok je vanjska temperatura iznosila 22,6°C. Nakon 25 minuta, zabilježen je pad unutarnje temperature od 2,5°C u odnosu na početnu temperaturu, što je rezultiralo vrijednošću od 20,7°C, dok je vanjska temperatura u 20. minuti dosegla 22,5°C, ostavši nepromijenjena do završetka testiranja. Ukupno smanjenje temperature unutar kutije nakon 45 minuta iznosilo je 3,8 °C, što je rezultiralo konačnom unutarnjom temperaturom od 19,4 °C. Ispravan rad svih komponenti tijekom testiranja te zabilježeni pad temperature ukazuju na određenu učinkovitost sustava u hlađenju ograničenog prostora.

5.3. Analiza rezultata

Rashladni uređaj pokazao je dobre performanse te solidnu učinkovitost u smanjenju temperature izoliranog prostora volumena 25,7 L, u odnosu na temperaturu okoline te tijekom perioda od 45 minuta. Početna unutarnja temperatura iznosila je 23,2 °C, a do završetka mjerenja umanjena je do vrijednosti od 19,4°C, što predstavlja ukupno smanjenje od 3,8°C. Prosječan pad temperature iznosio je oko 0,09°C po minuti, odnosno 0,5°C svakih 5 minuta. Unatoč značajnom padu temperature, postignuti rezultati nisu ispunili predviđena očekivanja te nije ostvaren cilj smanjenja temperature od 10°C, no određenim promjenama i implementacijom potencijalnih poboljšanja mogla bi se dodatno povećati učinkovitost sustava. Jedna od mogućih modifikacija odnosi se na poboljšanje izolacije korištene kutije od stiropora; dodavanjem dodatnog sloja izolacije ili odabirom boljeg izolacijskog materijala, mogao bi se minimalizirati utjecaj vanjske topline, čime bi se poboljšao učinak hlađenja. Osim samog materijala, dobra brtvljenost može značajno doprinijeti sprječavanju dopiranja toploga zraka te zadržavanju hladnog zraka unutar kutije. Razmatrajući modifikacije na samome uređaju, moguća optimizacija mogla bi se postići promjenom pozicije, veličine i broja rupa na cijevi, što bi rezultiralo povećanjem protoka zraka kroz uređaj te učinkovitijim hlađenjem. Korištenjem snažnijeg Peltier modula, veće rashladne snage i boljih termalnih karakteristika, omogućilo bi se brže postizanje te održavanje nižih temperatura, odnosno veći temperaturni pad u jednakom vremenskom intervalu. Učinkovitije hlađenje moglo bi se postići i korištenjem većeg hladnjaka, čija će veća površina omogućiti bolje odvođenje

topline, kao i korištenje hladnjaka izrađenih od materijala s višim koeficijentom toplinske vodljivosti od aluminija, poput bakra. Implementacija navedenih poboljšanja mogla bi značajno doprinijeti boljoj izvedbi rashladnog uređaja te omogućiti postizanje nižih temperatura u kraćem vremenskom roku, odnosno dostizanje početno postavljenih ciljeva.

6. Zaključak

Nastojanje da se pronade što učinkovitija metoda za rashlađivanje, polovinom 19. stoljeća znanstvenike dovodi do otkrića pojave termoelektriciteta, procesa pretvaranja toplinske energije u električnu, odnosno električne energije u toplinsku. Nova saznanja o efektima do tad nepoznatog fenomena rezultirala su inovacijama u rashladnoj tehnologiji, odnosno razvojem alternativnog načina hlađenja koji će moći konkurirati tradicionalnim rashladnim metodama. Među mnogim inovacijama temeljenima na termoelektričnom efektu istaknuo se Peltier modul, elektronička komponenta malih dimenzija koja za rad koristi tzv. Peltierov efekt, pojavu koja uzrokuje hlađenje jedne strane te grijanje druge strane modula. U ovome radu istraživao se potencijal termoelektričnog hlađenja uporabom Peltier modula, koji je korišten kao temelj pri izradi rashladnog uređaja čije su komponente upravljane Arduino platformom. Nakon povijesnog pregleda rashladnih uređaja koji pruža uvid u tehnološke napretke te smješta Peltier modul u povijesni kontekst, slijedio je detaljan opis izrade uređaja, od odabira potrebnih komponenti i konstrukcije kućišta, sve do implementacije i povezivanja uređaja s Arduinoom. Testiranjem uređaja te analizom rezultata mjerenja, zaključeno je kako je uređaj pokazao dobre performanse, ali solidnu učinkovitost jer nije u potpunosti ostvario zadani cilj - smanjenje temperature za 10°C unutar izolirane kutije. Takav ishod testiranja ukazao je na potrebu za daljnjim poboljšanjima sustava, a predložene modifikacije uključuju bolju izolaciju prostora kojega je potrebno ohladiti, povećanje protoka zraka kroz uređaj kako bi se postiglo uspješnije hlađenje te odabiranje komponenti za izradu uređaja koje bi učinkovitije izvršavale svoje funkcije u sustavu. Unatoč činjenici da uređaj nije ostvario očekivane rezultate, ovaj projekt pružio je dobar uvid u rad s termoelektričnim modulima, a stečena znanja i iskustva mogu poslužiti kao osnova za buduće projekte i istraživanja na području termoelektričnog hlađenja. Implementacijom predloženih poboljšanja te dodatnim proučavanjem rada uređaja mogla bi se povećati njegova učinkovitost, čime bi se potencijalno omogućila njegova šira primjena u svakodnevnom životu ili specifičnim industrijskim procesima. Kombiniranjem znanja iz povijesti tehnike, elektronike, programiranja te njihove praktične primjene, kroz ovaj se rad ističe važnost interdisciplinarnog pristupa u razvoju novih tehnologija koja će budućim generacijama, osim inovativnih rješenja, osigurati i put ka održivoj i tehnološki naprednoj budućnosti.

Literatura

- [1] V. Brlek: Rashladna tehnika, Tehnička enciklopedija, sv. 11, str. 430–468, Zagreb, 1988.
- [2] rashladni stroj. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2013 – 2024. Pristupljeno 30.1.2024. <https://enciklopedija.hr/clanak/rashladni-stroj>
- [3] Z. Perić, Weebly.com, Tehnika hlađenja, https://zoranpericsplit.weebly.com/uploads/1/2/4/9/12491619/tehnika_hlaenja.pdf
- [4] Energy.gov, History Timeline: Refrigeration and Refrigerators, <https://www.energy.gov/energysaver/history-timeline-refrigeration-and-refrigerators>
- [5] Earth Architecture, Yakhchal: Ancient Refrigerators, <https://eartharchitecture.org/?p=570>
- [6] Medium, Egyptian Evaporative Cooling: Austin Refrigeration's Ancient Cooling Techniques, <https://medium.com/@austinrefrigeration/egyptian-evaporative-cooling-austin-refrigerations-ancient-cooling-techniques-101-1d9fd944b20e>
- [7] SPAB, From the Archive: Ice Houses, <https://www.spab.org.uk/news/archive-ice-houses>
- [8] Boyle, Robert. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2013 – 2024. Pristupljeno 5.2.2024. <https://www.enciklopedija.hr/clanak/boyle-robert>
- [9] UCLPRESS, Bentham's Frigidarium: Utilitarianism and Food Preservation, <https://uclpress.scienceopen.com/hosted-document?doi=10.14324/111.2045-757X.008>
- [10] USHistory.org, Franklin and Air-Conditioning, <https://www.ushistory.org/franklin/science/airconditioning.htm>
- [11] Profitiraj.hr, Ovo je povijest klima uređaja – tehnologije bez koje danas ne možemo, <https://profitiraj.hr/ovo-je-povijest-klima-uredaja-tehnologije-bez-koje-danas-ne-mozemo/>
- [12] Energy.gov, History of Air Conditioning, <https://www.energy.gov/articles/history-air-conditioning>
- [13] CoyneCollage, A Brief History of HVAC, <https://www.coynecollege.edu/a-brief-history-of-hvac-air-conditioning/>
- [14] DRS, James Harrison, Australia, and the World's First Patented Refrigerator, <https://dynamicrefrigeration.com.au/blog/james-harrison-ice-machine/>
- [15] Science History Institute, Carl von Linde, <https://sciencehistory.org/education/scientific-biographies/carl-von-linde/>
- [16] Britannica, Carl von Linde, <https://www.britannica.com/biography/Carl-Paul-Gottfried-von-Linde>

- [17] Howden, The History of Buffalo Forge, <https://www.howden.com/en-us/articles/refrigeration/the-history-of-buffalo-forge-infographic>
- [18] ASME, The American Society of Mechanical Engineers, Global Cooling: The History of Air Conditioning, <https://www.asme.org/topics-resources/content/global-cooling-the-history-of-air-conditioning>
- [19] National Museum of American History, Carrier Centrifugal Refrigeration Compressor, https://americanhistory.si.edu/collections/nmah_846092
- [20] Smithsonian Magazine, The Unexpected History of the Air Conditioner, <https://www.smithsonianmag.com/smithsonian-institution/unexpected-history-air-conditioner-180972108/>
- [21] Today's Homeowner, History of Air Conditioners, <https://todayshomeowner.com/hvac/guides/history-of-air-conditioners/>
- [22] Washington Energy Services, A Brief History of Air Conditioning, <https://www.washingtonenergy.com/air-conditioners-history-and-timeline/>
- [23] Proleksis enciklopedija, Termoelektricitet, <https://proleksis.lzmk.hr/48669/>
- [24] IEEE Explore, R. E. Simons, R. C. Chu, Application of Thermoelectric Cooling to Electronic Equipment: A Review and Analysis, <https://ieeexplore.ieee.org/document/837055>
- [25] Science Struck, Pros, Cons, and Applications of the Peltier Effect Explained, <https://sciencestruck.com/peltier-effect-explained>
- [26] KryoTherm, Production of Thermoelectric Modules, <https://kryothermtec.com/historical-background.html>
- [27] Thermoelectrics, Northwestern Materials Science and Engineering, Brief History of Thermoelectrics, <https://thermoelectrics.matsci.northwestern.edu/thermoelectrics/history.html>
- [28] Mithras, A Brief History of Thermoelectrics, <https://mithras.tech/2019/03/14/a-brief-history-of-thermoelectrics/>
- [29] TechTarget, IBM, <https://www.techtarget.com/searchitchannel/definition/IBM-International-Business-Machines>
- [30] IEEE Explore, J. G. Stockholm, Current State of Peltier Cooling, <https://ieeexplore.ieee.org/document/666972>
- [31] Meerstetter Engineering, Peltier Element Applications, <https://www.meerstetter.ch/customer-center/compendium/33-peltier-element-applications>
- [32] Robocraze, Peltier Cooler, Working Principle & Applications, <https://robocraze.com/blogs/post/peltier-cooler>

- [33] Kyocera, Peltier module (Thermoelectric Module), <https://global.kyocera.com/prdct/ecd/peltier/>
- [34] Matsusada Precision, What is Thermoelectric Coolers (TEC)? Peltier Module Principles and Applications, https://www.matsusada.com/column/peltier_module.html
- [35] Science Direct, Peltier Effect, <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/peltier-effect>
- [36] Lab Incubators. net, Peltier vs. Compressor – Based Cooling, <https://labincubators.net/blogs/blog/peltier-vs-compressor-based-cooling>
- [37] Analog Technologies, Inc., The Advantages and Disadvantages of TEC Modules, <https://www.analogtechnologies.com/white-paper/2015/0403/358.htm>
- [38] AZO Materials, Will Peltier Modules Replace Compressors in Thermoelectric Cooling Technology?, <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=11389>
- [39] A. Subki, A. R., Abd Rashid, W. N., Ab Hadi, I. N. A., Jidin, A. Z., & Ying, T. S. (2018). Development of Portable Air Conditioning Using Peltier Effect For Small Area Uses. Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering (JTEC), 10(2-6), 99–103. Preuzeto sa: <https://jtec.utem.edu.my/jtec/article/view/4377>
- [40] M. K. R. Alam, H. Fitriawan, F. X. Arinto Setyawan, U. Murdika. (2019.). Design of Cooling and Heating Tool Using Thermoelectric Peltier Based on Arduino Uno, Jurnal Teknik Elektro, Vol. 13 No.1, April 2021, pp. 41 – 47. Preuzeto sa: https://www.researchgate.net/publication/351028216_Design_of_Cooling_and_Heating_Tool_Using_Thermoelectric_Peltier_Based_On_Arduino_Uno
- [41] Li, M. ., & Zhu, N. (2023). Development of Ultra-Low Temperature Cooling System Based on Peltier Module. Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering, 11(1), JRAME–23. Preuzeto sa: <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/jrame/article/view/251399>
- [42] DigiKey, Choosing and Using Advanced Peltier Modules for Thermoelectric Cooling, <https://www.digikey.com/en/articles/choosing-using-advanced-peltier-modules-thermoelectric-cooling>
- [43] phy. pmf. unizg. hr, Peltierova toplinska pumpa, <https://www.phy.pmf.unizg.hr/~kivan/Peltierovefekt.htm>
- [44] Advanced Thermoelectric, How A Thermoelectric Cooler Works, <https://www.electracool.com/moduleworking.html>
- [45] Šumiga, I., Grđan, M. i Huđek, J. (2007). Termoelektrični moduli - fizikalne osnove i smjernice za uporabu. Tehnički glasnik, 1 (1-2), 5-10. Preuzeto s <https://hrcak.srce.hr/85970>

- [46] AllDataSheet.com, Electronic Components Datasheet Search, https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Tec1-12706&gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw-r-vBhC-ARIsAGgUO2BZiIXhf_eLOIVqCkficoxwaSIbuFUW7h9oOF7p1Sv3Ag2STaeU-JEaAvuwEALw_wcB
- [47] Trenton Systems, What is a Heat Sink, and How Does it Work?, <https://www.trentonsystems.com/en-us/resource-hub/blog/what-is-a-heat-sink>
- [48] VidiLab, Kako poboljšati performanse procesora pravilnom uporabom termalne paste, <https://www.vidilab.com teme/hardverska-tema/3766-termalna-pasta-od-a-do-z>
- [49] Sparkfun, What is an Arduino?, <https://learn.sparkfun.com/tutorials/what-is-an-arduino/all>
- [50] Solderer, Što je Arduino, a što Dasduino?, <https://soldered.com/hr/learn/sto-je-arduino-a-sto-croduino/>
- [51] eYewated, Saznajte što IDE znači u razvoju web stranica, <https://hr.eyewated.com/saznajte-sto-ide-znaci-u-razvoju-web-stranica/>
- [52] Arduino Docs, What is Arduino?, <https://docs.arduino.cc/learn/starting-guide/whats-arduino/>
- [53] diykits.eu, Croduino Basic 3, https://diykits.eu/shophr/products/_sale/11690
- [54] Fritzing, Welcome to Fritzing, <https://fritzing.org/>

Slike

Slika 1 – Earth Architecture, Yakhchal: Ancient Refrigerators, <https://eartharchitecture.org/?p=570>

Slika 2 – Advanced Thermoelectric, How A Thermoelectric Cooler Works, <https://www.electracool.com/moduleworking.html>

Slika 3 – ICEcube, Thermoelectrics/Peltier Effect Described, <https://www.icecube.com/technical/thermoelectrics-peltier-effect-described/>

Slika 5 - Solderer, Što je Arduino, a što Dasduino?, <https://soldered.com/hr/learn/sto-je-arduino-a-sto-croduino/>