

Mjerenje temperature stijena uporabom temperaturnog senzora i Raspberry Pi-a

Murčić, Mirko

Master's thesis / Diplomski rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:560206>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-14**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO – GEOLOŠKO – NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij geologije

**MJERENJE TEMPERATURE STIJENA UPORABOM
TEMPERATURNOG SENZORA I RASPBERRY PI-a**

Diplomski rad

Mirko Murgić

G – 136

Zagreb, 2015.

ZAHVALA

Veliku zahvalnost dugujem mentoru izv. prof. dr. sc. Tomislavu Malviću na pomoći, podršci, ukazanom povjerenju i brojnim korisnim savjetima tijekom odabira teme i izrade rada.

Želio bih zahvaliti i članovima povjerenstva za ocjenu rada prof. dr. sc. Željku Andreiću te doc. dr. sc. Daliboru Kuhineku na uloženom trudu i korisnim primjedbama koji su doprinijeli boljem sadržaju diplomskog rada.

Na kraju se posebno zahvaljujem onima koji su mi svojim razumijevanjem i prisustvom bili od neprocjenjive pomoći – svojim roditeljima Nadi i Marinku te djevojci Martini.

Mjerenje temperature stijena uporabom temperaturnog senzora i Raspberry Pi-a

Mirko Murgić

Diplomski rad je izrađen: Sveučilištu u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu
Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Toplinska vodljivost je fizičko svojstvo koje opisuje prijenos topline kroz neki materijal. Znanje o toplinskoj vodljivosti je važno za razumijevanje i modeliranje temperature u sedimentacijskim bazenima. Volumetrijski toplinski kapacitet određuje količinu topline potrebnu da se podigne temperatura jedinici volumena stijene za jedan stupanj. Toplinska vodljivost određuje gdje i koliko topline teče kao odgovor na razlike u temperaturama u ležištu. Danas postoje brojni uređaji kojima se mogu mjeriti svojstva toplinske vodljivosti i volumetrijskog toplinskog kapaciteta, no njihova cijena često je prepreka mnogima da ih koriste. U ovom radu je opisan relativno jeftin i brz način mjerenja temperature stijena uz pomoć temperaturnog senzora i Raspberry Pi-a pomoću čega se na jednostavan način proračunom iz jednadžbi mogu dobiti vrijednosti pomoću kojih je moguće odrediti toplinska svojstva stijena.

Ključne riječi: toplinska vodljivost, volumetrijski toplinski kapacitet, Raspberry Pi, toplinski senzor.

Diplomski rad sadrži: 43 stranice, 7 poglavlja, 23 slike, 4 tablice, 9 jednadžbi

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad je pohranjen u: knjižnici Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Tomislav Malvić, izv. prof.

Ocjenjivači :

Izv. prof. dr. sc. Tomislav Malvić
Prof. dr. sc. Željko Andreić
Doc. dr. sc. Dalibor Kuhinek

Datum obrane: 30. rujna 2015.

Measuring the temperature of rocks using a thermal sensor and Raspberry Pi

Mirko Murgić

Thesis was made: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Geology and Geological Engineering
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

Thermal conductivity is a physical property that describes the transfer of heat through a material. Knowledge of thermal conductivity is important for understanding and modelling the temperature in sedimentary basins. Volumetric heat capacity determines the amount of heat needed to increase a temperature of a unit by one degree. Thermal conductivity determines where and how much heat is flowing as a response in heat differences in the deposit. Today, there is many devices that can measure the properties of thermal conductivity and volumetric heat capacity, but their price is an obstacle for a wider use. In this thesis a relatively cheap and quick method is described for measuring the rock temperature using a thermal sensor and Raspberry Pi and by calculating the values from equations to determine the thermal properties of the rocks.

Key words: thermal conductivity, volumetric heat capacity, Raspberry Pi, thermal sensor.

Thesis contains: 43 pages, 7 chapters, 23 pictures, 4 tables, 9 equations

Original in: Croatian

Thesis is deposited in: Library of the Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: PhD. Tomislav Malvić, Assoc. Prof.

Evaluators:
PhD. Tomislav Malvić, Assoc. Prof., Grad. in Geol.
PhD. Željko Andreić, Full Prof., Grad. in Physics
PhD. Dalibor Kuhinek, Assist. Prof., Grad. in Electrotechn.

Date of defense: September 30. of the 2015.

SADRŽAJ :

1. UVOD.....	1
2. ZEMLJOPISNIM SMJEŠTAJ UZORKOVANIH LOKACIJA.....	5
3. OSNOVNI GEOLOŠKI PODATCI O UZORKOVANOM SMJESTIŠTU I OKOLICI.....	7
3.1. Lapor, njegov sastav i odraz na prosječne temperaturne vodljivosti.....	8
3.2. Vapnenac, njegov sastav i odraz na prosječne temperaturne vodljivosti.....	8
4. TOPLINSKA PROVODLJIVOST STIJENA.....	10
4.1. Načini mjerenja temperature medija.....	13
4.1.1. Stacionarne metode.....	13
4.1.2. Prijelazne metode.....	14
4.1.2.1. Provodljivi ravni izvor (TPS metoda).....	15
4.1.2.2. Prilagođeni provodni ravni izvor (MTPS metoda).....	16
4.1.2.3. Provodni linijski izvor (TLS metoda).....	16
5. EKSPERIMENTALNA OPREMA I MJERNI PROGRAMI.....	18
5.1. Raspberry Pi (model B+).....	18
5.2. Toplinski digitalni senzor DS18B20.....	19
5.3. Praktično spajanje RasPi i DS18B20 te probno mjerenje temperature okoliša.....	21
5.4. Programska podrška za temperaturni senzor unutar Raspbian.....	22
5.4.1. Opažanje sonde u Raspbianu, aktiviranje kanala i očitavanje temperature...	23
5.4.2. Mjerenje temperature u vremenskoj petlji u Raspbian «shell» skripti.....	24
5.4.3. Mjerenje temperature sondom u Pythonu.....	26
5.4.4. Podizanje VNC poslužitelja pri pokretanju RasPi-ja.....	28
6. MJERENJE TOPLINSKE VODLJIVOSTI.....	30
6.1. Mjerenje na načelu otapanja leda do sobne temperature.....	31
6.2. Mjerenje na načelu grijanja vode do kipljenja.....	33
6.3. Proračun vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta.....	36
6.4. Proračun vrijednosti toplinskog kapaciteta.....	37
7. DISKUSIJA.....	39
8. ZAKLJUČAK.....	41
9. LITERATURA.....	42

POPIS SLIKA

Slika 1-1: Računalo Sinclair ZX 81

Slika 1-2: Računalo Sinclair ZX Spectrum

Slika 1-3: Računalo Commodore 64

Slika 1-4: Računalo Orao

Slika 2-1: Položaj kamenoloma Mali Čardak

Slika 2-2: Lokacija uzorkovanja u kamenolomu Mali Čardak

Slika 3-1: Geološka građa Grabovače i šireg područja (OGK List Gospić)

Slika 3-2: Uzorci vapnenca s probušenim rupama za termalni senzor

Slika 4-1: Termalna svojstva uobičajenih materijala

Slika 4-2: Metoda podijeljene šipke

Slika 4-3: TPS senzor, model Hot Disk 4922

Slika 4-4: MTPS senzor

Slika 5-1: Matična ploča i mikrokontroleri Raspberry Pi-ja, model B+

Slika 5-2: Označavanje i numeracija pinova na GPIO spojnica RasPi-ja.

Slika 5-3: Način spajanja senzora DS18B20 na GPIO RasPi modela B+.

Slika 5-4: Sastavljena konfiguracija RasPi, WiFi antene, senzora i tipkovnice.

Slika 5-5: Izravno očitavanje vrijednosti temperature senzora unutar LXTerminala (Raspiana)

Slika 6-1: Uzorak vapnenca broj 1

Slika 6-2: Uzorak vapnenca broj 2

Slika 6-3: Mjerenje temperature na načelu otapanja leda na uzorku br. 2

Slika 6-4: Krivulja mjerenja temperature na načelu otapanja leda za uzorak br. 2

Slika 6-5: Mjerenje temperature na načelu grijanja vode na uzorku br. 2

Slika 6-6: Krivulja mjerenja temperature na načelu grijanja vode za uzorak br. 2

POPIS TABLICA

Tablica 4-1: Toplinska vodljivost nekih stijena i fluida

Tablica 6-1: Rezultati mjerenja na načelu otapanja leda do sobne temperature

Tablica 6-2: Rezultati mjerenja na načelu grijanja vode do kipljenja

Tablica 7-1: Vrijednosti toplinskog kapaciteta, difuzivnosti i vodljivosti za vapnence

POPIS UPOTRIJEBLJENIH OZNAKA

q - stopa toplinskog toka ($J/s = W$) u smjeru x ,

T – temperatura ($^{\circ}C$),

λ – koeficijent toplinske vodljivosti (W/mK),

Q - snaga po jedinici dužine ($W m^{-1}$),

k - toplinska provodljivost uzorka ($W m^{-1}K^{-1}$),

$Ei(x)$ - eksponencijalni integral, transcendentna matematička funkcija,

r - radijalna udaljenost do linijskog izvora,

a - toplinska difuzivnost (m^2s^{-1}),

t - vrijeme koje je proteklo od kad je grijanje počelo (s),

c_p (sample) - teorijski toplinski kapacitet uzorka ($J / ^{\circ}C g$),

c_p (water) - teorijski toplinski kapacitet vode ($J / ^{\circ}C g$),

S.H. - specifični toplinski kapacitet uzorka, relativna vrijednost u odnosu na vodu, bezdimenzionalna veličina,

Q – toplinski kapacitet (J),

C_p – specifični toplinski kapacitet uzorka ($J/kg K$),

m – masa uzorka (kg),

Δt – promjena u temperaturi (K).

1. Uvod

Toplinska vodljivost je fizikalno svojstvo koje opisuje prijenos topline kroz neki materijal. Znanje o toplinskoj vodljivosti je važno za razumijevanje i modeliranje temperature u taložnim bazenima. Inženjeri često upotrebljavaju ležišne simulacije da bi dizajnirali programe potpomognutog izvlačenja ugljikovodika (EOR, engl. *Enhanced Oil Recovery*) i predvidjeli količinu dodatne nafte pripisane termalnoj stimulaciji i proizvodnim stopama kroz vrijeme na raznim bušotinama u polju (**Chekhonin et al., 2012**). Da bi se to postiglo, simulatori upotrebljavaju sofisticirane algoritme koji izračunavaju razvoj temperature i toplinskog toka unutar ležišta nakon stimulacije. Ove dvije veličine, temperatura i toplina, su povezane s termalnim svojstvima stijena i pornim fluidima. Najvažnije od ovih svojstava su volumetrijski toplinski kapacitet, toplinska vodljivost i toplinska difuzivnost (**Chekhonin et al., 2012**).

Volumetrijski toplinski kapacitet određuje količinu topline potrebne da se podigne temperatura jedinici volumena stijene (i bilo kojeg pornog fluida) za jedan stupanj. Toplinska vodljivost određuje gdje i koliko topline teče kao odgovor na razlike u temperaturama u ležištu. Toplinska difuzivnost određuje brzinu pri kojoj se temperaturno „čelo“ pomiče kroz ležište (**Chekhonin et al., 2012**).

U 80-im godinama prošlog stoljeća, pojavila su se prva, jako raširena kućna računala koja su glede dostupnosti, snage i programibilnosti bila jako slična onome što danas predstavlja Raspberry Pi. Neka od najpopularnijih su bila Sinclair ZX81 (**slika 1-1.**), Sinclair ZX Spectrum 16K, 48K te 2+ (**slika 1-2.**), Commodore 64 (**slika 1-3.**) te vrlo popularan u hrvatskim školama u drugoj polovici 80-ih godina, računalo Oreo (**slika 1-4.**).

Raspberry Pi je serija računala veličine kreditne kartice, razvijena u Ujedinjenom Kraljevstvu od strane zaklade Raspberry Pi s namjerom promoviranja učenja osnovnih računalnih znanosti u školama. Originalni Raspberry Pi i Raspberry Pi 2 se proizvode u nekoliko konfiguracija kroz licencirane proizvodne ugovore sa kompanijama koje ih prodaju. Zaklada pruža preuzimanje prilagođenih Debian i Arch Linux ARM distribucija. Alati su dostupni za Python kao glavni programski jezik, uz potporu za BBC BASIC, C, C++, Java, Perl i Ruby. Zaključno s 18. II. 2015., prodano je preko pet milijuna Raspberry Pi-ja što ga čini najbrže prodavanim britanskim osobnim

računalom, te je Raspberry Pi također isporučio drugi po veličini broj jedinica (nakon Amstrad PCW serije, 8 milijuna).

Početak veljače 2015., izbačena je sljedeća generacija Raspberry Pi-a, Raspberry Pi 2. Novo računalo je inicijalno dostupno samo u jednoj konfiguraciji (model B), a značajke su mu Broadcom BCM2836 čip, četvero-jezgri ARM Cortex-A7 procesor, VideoCore IV dvo-jezgrena grafička jedinica, 1 gigabajt RAM-a, dok su ostale specifikacije slične onima prijašnje generacije modela B+. Ono što je presudno je da Raspberry Pi 2 ima istu cijenu (US\$35) kao i model B, dok je model A+ nešto jeftiniji (US\$20).



Slika 1-1: Računalo Sinclair ZX 81 (izvor: uz dopuštenje Peek and Poke muzeja u Rijeci, 2014.)



Slika 1-2: Računalo Sinclair ZX Spectrum 2+ (izvor: uz dopuštenje Peek and Poke muzeja u Rijeci, 2014.)



Slika 1-3: Računalo Commodore 64 (izvor: uz dopuštenje Peek and Poke muzeja u Rijeci, 2014.)

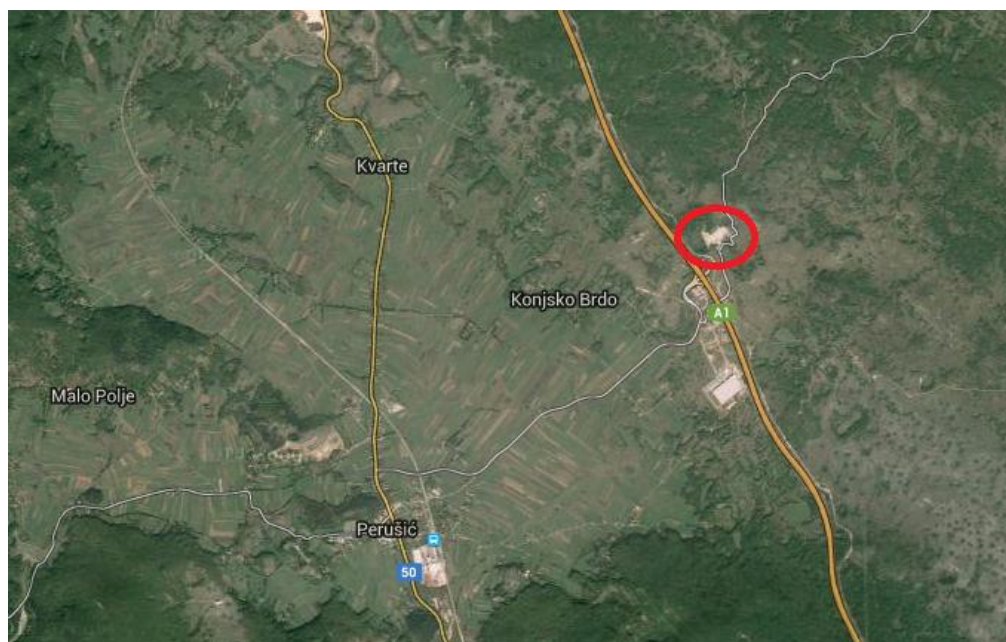


Slika 1-4: Računalo Orao (izvor: uz dopuštenje Peek and Poke muzeja u Rijeci, 2014.)

Mjerenjem temperature stijena pomoću toplinskog senzora i Raspberry Pi-a i zatim računanjem toplinske vodljivosti pomoću jednadžbi razvijena je relativno jeftina i brza metoda za određivanje temperaturnih svojstva uzorka stijene uzetog na terenu, a ispitanog u laboratoriju. Ova metoda je jednostavnija od standardnih metoda koje se koriste pri određivanju toplinske vodljivosti i ostalih elementarnih veličina poput volumetrijskog toplinskog kapaciteta i mogla bi naći široku primjenu u inženjerskoj struci i sveučilišnim istraživanjima.

2. Zemljopisni smještaj uzorkovanih lokacija

Uzorci stijena za određivanje toplinske vodljivosti su uzeti na području Općine Perušić (**slika 2-1.**), Ličko–senjska županija, u kamenolomu Mali Čardak koji se nalazi na izlazu/ulazu sa autoceste A1 (**slika 2-2.**).



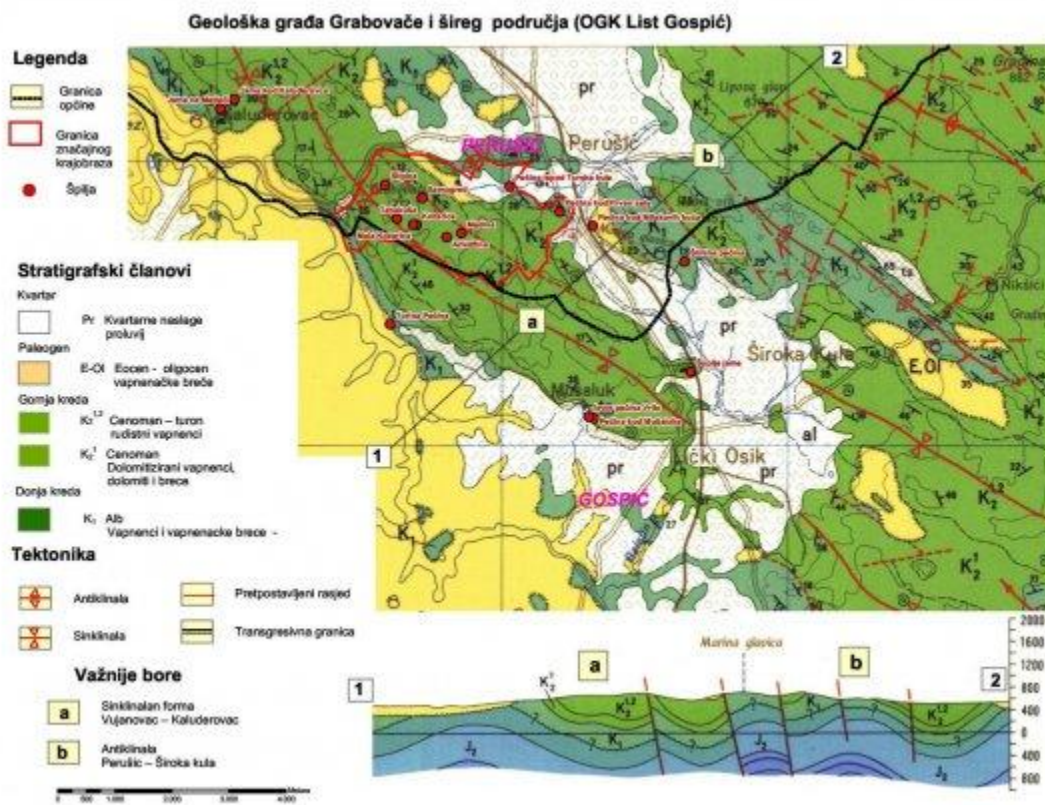
Slika 2-1: Položaj kamenoloma Mali Čardak. Preuzeto s Google Maps.



Slika 2-2: Lokacija uzorkovanja u kamenolomu Mali Čardak. Preuzeto s Google Earth.

3. Osnovni geološki podatci o uzorkovanom smjestištu i okolici

Na području općine Perušić i šireg područja najstarije naslage su iz razdoblja krede (**slika 3-1**). Razdoblje krede traje 144 – 66 milijuna godina a zastupljeno je naslagama koje čine vapnenci i vapnenačke breče (alb). Mlađe paleogenske naslage (vapnenačke breče, konglomerati i vapnenci) zauzimaju manji dio područja. Ove stijene su sive, sivosmeđe ili crvenkaste boje. Postanak ovih naslaga vezan je uz jaku eroziju reljefa, kratak transport materijala i njegovu brzu sedimentaciju.



Slika 3-1: Geološka građa Grabovače i šireg područja (OGK List Gospić). Preuzeto s <http://pp-grabovaca.hr/about/geologija/>

Najmlađe kvartarne naslage izložene su u nižim dijelovima terena na Perušićkom polju. Radi se o pretežno kiselim oligotrofnim smeđim tlima koja su mjestimično pokrivena tankim slojem humusa. Zemlja crvenica javlja se samo mjestimično jugoistočno od Perušića. Smatra se da su

ove pojave sekundarne i da su ove naslage nastale pretaložavanjem primarnih naslaga s Velebita djelovanjem vode u gornjem pleistocenu.

3.1. Lapor, njegov sastav i odraz na prosječne temperaturne vodljivosti

Lapori (engl. *marl*) su miješane karbonatno-glinovite stijene sastavljene od varijabilnih odnosa kriptokristalastog ili mikrokristalastog kalcita i od siliciklastičnog detritusa pelitnih dimenzija, prije svega gline. Dio kalcita može biti kemogena porijekla, tj. nastati izlučivanjem iz morske ili jezerske vode, a dio može biti najsitniji karbonatni detritus (Tišljarić, 1994).

Laporom obično smatramo stijenu koja sadrži između 20 % i 80 % gline i 20 % i 80 % kalcita. Lapori koji sadržavaju manje gline, kao kalcitom bogati lapori (65 % do 80 % kalcita), postupno prelaze u glinoviti vapnenac (80 % do 90 % kalcita), a lapori s manje karbonata (10 % do 20 %) u kalcitične gline ili tzv. kalcitične muljnjake (engl. *calcareous mudstone*) ako uz čestice dimenzija glina i minerale glina sadrže još i znatniji udio siliciklastičnog detritusa dimenzija sitnog do srednjeg praha. Po istom načelu primijenjenom kod kalcitom bogatog lapora, lapor koji sadrži 65 % do 80 % gline naziva se glinom bogati lapor ili glinoviti lapor. Stijenu koja je prije dijagenetskih procesa u većim dubinama zalijeganja bila sastavljena od kalcita i gline s međusobnim odnosom koji odgovara sastavu lapora, a nakon dijagenetskih procesa u većim dubinama zalijeganja tipični minerali glina transformirani su u hidrotinje, klorit, sericit ili muskovit, ne treba više smatrati laporom, već je to litificirani lapor, odnosno lapornjak ili marlit (engl. *marlstone*) ili pak kalcitični glineni šejl (*calcareous clay shale*) ako pokazuje lisnatost (Tišljarić, 1994). Toplinska vodljivost lapora iznosi $(1,1-2,1) \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, također je ovisna o sastavu lapora, dubini zalijeganja, i svojstvima fluida koji ispunjavaju šupljine.

3.2. Vapnenac, njegov sastav i odraz na prosječne temperaturne vodljivosti

Vapnenci su karbonatne stijene anorganskog i/ili organskog porijekla pretežno (>50 %) sastavljene od kalcita. Ako sadrže više od 90 % kalcita to su tzv. čisti vapnenci za koje se upotrebljava samo naziv vapnenac, ako sadrže od 50 % do 90 % kalcita, manje od 10 % siliciklastičnog materijala i od 10 % do 50 % dolomite, to su dolomitični vapnenci. Ako sadrže od 50 % do 90 % kalcita, a od 10 % do 50 % siliciklastičnog materijala i dolomite, od čega je

više od 10 % dolomita, to su nečisti, odnosno glinoviti dolomitični vapnenci, siltozni dolomitični vapnenci i pjeskoviti dolomitični vapnenci te, ako sadrže od 50 % do 90 % kalcita i 10 % do 50 % siliciklastičnog materijala, a manje od 10 % dolomita, to su glinoviti vapnenci, siltozni vapnenci ili pjeskoviti vapnenci (Tišljarić, 1994).

Toplinska vodljivost vapnenaca iznosi $(2,5-3) \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$, te ovisi o temperaturi, tlaku, šupljikavosti, sastavu i o svojstvima fluida i plinova koji zapunjavaju pore. Vrijednosti koeficijenta termalne vodljivosti širokog su raspona za stijene i tvari koje ispunjuju šupljine.

Prema osnovnoj geološkoj karti, list Gospić (slika 3-1), određena je starost uzoraka (slika 3-2) iz kamenoloma Mali Čardak. Prema njoj uzorak pripada Gornjoj Kreda, razdoblju cenomana, koji pokriva razdoblje između $99,6 \pm 0,9$ milijuna godina i $93,5 \pm 0,8$ milijuna godina. Po sastavu te stijene su dolomitizirani vapnenci.



Slika 3-2: Uzorci vapnenca s probušenim rupama za termalni senzor

4. Toplinska vodljivost stijena

Konduktivna toplinska vodljivost odnosno koeficijent toplinske vodljivosti (skr. KTV) nekog materijala definira njegovu sposobnost da prenosi toplinu. Zamislimo beskonačnu ravninu zida načinjenog od određenog materijala sa debljinom od jedne jedinice u duljini. Strane tog zida se održavaju na konstantnoj temperaturi, a razlika u temperaturi je jednaka 1 °C.

Također pretpostavimo da senzor može mjeriti količinu topline po jedinici područja zida po jedinici vremena. U ovom slučaju količina mjerene topline biti će numerički jednaka koeficijentu toplinske vodljivosti (λ) danog materijala. Dimenzije ovih količina u SI sustavu su dane u $\text{J m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{K}^{-1}$ ili u $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$.

Eksperimentalno je otkriveno da količina prenesene topline kroz zid (q_A) je proporcionalna površini (A) i omjeru razlika temperature (ΔT) i debljine zida (Δx). Ova izjava je poznata kao Fourierov zakon (ili jednadžba) toplinske difuzije. U diferencijalnom obliku, Fourierov zakon za jedinicu područja može biti izražen formulom:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \quad \text{(jednadžba 4-1)}$$

gdje su:

q - stopa toplinskog toka ($\text{J/s} = \text{W}$) u smjeru x ;

x – debljina zida (m);

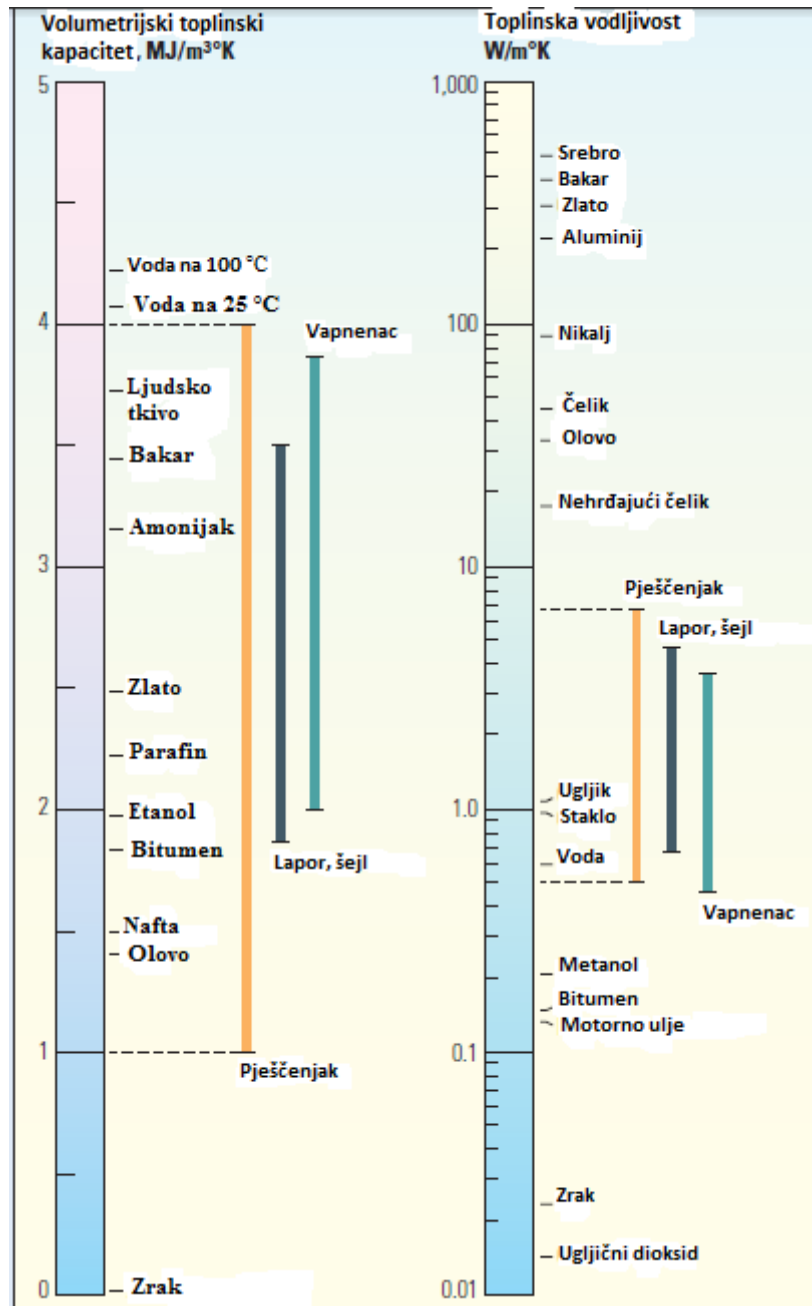
T – temperatura (°C);

λ – koeficijent toplinske vodljivosti (W/mK).

Negativni predznak je zbog činjenice da toplina ide u smjeru niže temperature. Standardne vrijednosti toplinske vodljivosti nekih materijala dane su u **tablici 4-1** i na **slici 4-1**.

Tablica 4-1.: Toplinska vodljivost nekih stijena i fluida (Polechau et al., 1997)

Materijal	$Wm^{-1} K^{-1}$	Izvor
Zemljina kora	2,0-2,5	Kappelmeyer i Hänel (1974)
Stijene (općenito)	1,2-5,9	Sass et al. (1971)
Pješčenjak	2,5	Clark (1966)
Lapor	1,1-2,1	Clark (1966), Blackwell and Steele (1989)
Vapnenac	2,5-3	Clark (1966), Robertson (1979)
Voda	0,6 na 20 °C	Birch et al. (1942)
Nafta	0,15 na 20 °C	Birch et al. (1942)
Led	2,1	Gretnener (1981)
Zrak	0,025	CRC (1974) Handbook
Metan	0,033	CRC (1974) Handbook



Slika 4.1: Termalna svojstva uobičajenih materijala (Chekhonin et al., 2012)

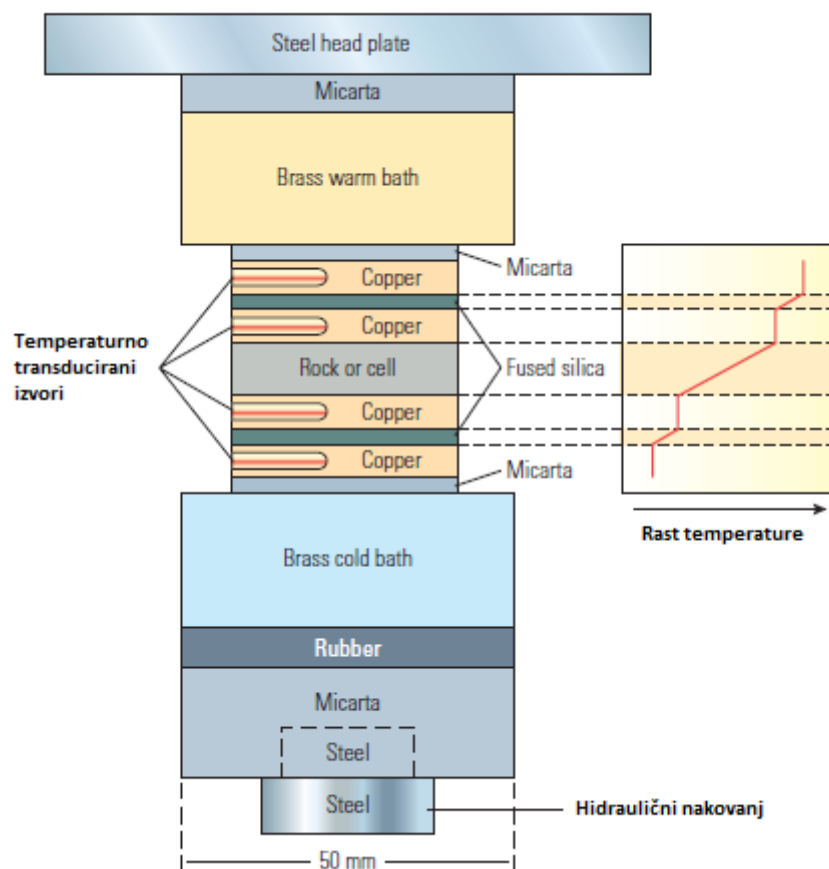
4.1. Načini mjerenja temperature medija

Postoje brojni načini mjerenja toplinske vodljivosti, gdje svaki odgovara za ograničeni opseg materijala, ovisno o toplinskim svojstvima i temperaturi sredine. Postoje dvije klase metoda koje mjere toplinsku vodljivost uzorka: stacionarne i nestacionarne (prijelazne) metode.

4.1.1. Stacionarne metode

Općenito, kod stacionarnih tehnika mjerenje se izvodi kada se temperatura mjenog materijala ne mijenja s vremenom. To čini analizu signala pouzdanom. Nedostatak ove tehnike je da je potreban dobar eksperimentalni postav.

U geologiji i geofizici, najčešća metoda za čvrste uzorke stijena je metoda podijeljene šipke (**slika 2-2**). Postoje brojne modifikacije ovih uređaja koje ovise o potrebnim temperaturama i tlakovima te o veličinama uzoraka. Uzorak nepoznate vodljivosti se stavi između dva uzorka poznate vodljivosti (obično ploče od mesinga). Postav je obično takav, da je vruća mesing ploča na vrhu, uzorak stijene u sredini, a hladna mesing ploča na dnu. Toplina se dovodi na vrh i kreće se prema dnu da bi se spriječila bilo kakva konvekcija unutar uzorka. Mjerenja se izvode nakon što je uzorak dosegnuo stanje konstantne temperature. Za to je potrebno oko 30 minuta ili više.



Slika 4-2: Metoda podijeljene šipke (Chekhonin et al., 2012)

4.1.2. Prijelazne metode

Prijelazne tehnike izvode mjerenje tijekom procesa zagrijavanja. Prednost je da se mjerenja mogu izvesti relativno brzo. Obično se izvode sa sondama.

Nestacionarnim metodama kojima se mjeri toplinska vodljivost nije potreban signal konstantne vrijednosti. Umjesto toga, signal se promatra kao funkcija vremena. Prednost ovih metoda je da se one općenito mogu vrlo brzo izvesti, budući da nije potrebno čekati stanje ravnoteže. Nedostatak je taj što je matematička analiza podataka mnogo teža.

4.1.2.1. Provodljivi ravni izvor (TPS metoda)

TPS (*engl. Transient Plane Source*) metoda koristi plosnati senzor (**slika 4-3**) i specijalni matematički model koji opisuje toplinsku vodljivost koja, u kombinaciji sa elektronikom, omogućuje metodi da mjeri svojstva toplinskog prijenosa. Pokriva raspon termalne vodljivosti od najmanje (0,01-500) W/m/K (u skladu sa ISO 22007-2) i može se uporabiti za mjerenje raznih vrsta materijala poput krutina, tekućina, pasti, tankih filmova itsl.



Slika 4-3: TPS senzor, model Hot Disk 4922, radijus spirale oko 15 mm. Preuzeto s http://en.m.wikipedia.org/wiki/Thermal_conductivity_measurement

TPS tehnika u pravilu koristi dvije polovice uzorka između kojih je senzor namješten, poput sendviča. Uzorci bi naravno trebali biti homogeni, te je moguća dugotrajna upotreba prijelazne pločice za ispitivanje homogenih materijala, uz pravilan odabir veličine senzora da bi se povećalo prodiranje u uzorak. Ova metoda se može koristiti i u jednostranoj konfiguraciji, sa uvođenjem poznatog izolacijskog materijala kao potpora senzoru.

Ravna površina senzora sastoji se od kontinuirane dvostruke spirale električno provodljivog nikla (Ni) izrezanog iz tanke folije. Nikalna spirala je smještena između dva sloja tankog polimidnog filma. Tanki polimidni film pruža senzoru električnu izolaciju i mehaničku stabilnost. Senzor se, da bi se moglo mjeriti, nalazi između dvije polovice uzorka. Tijekom mjerenja konstantni električni efekt prolazi kroz provodljivu spiralu, povećavajući temperaturu senzora, brzinom koja ovisi o svojstvima termalnog transporta materijala koji se mjeri. Mjereći temperaturu naspram vremenskog odziva u senzoru, možemo izračunati toplinsku provodljivost, difuzivnost te specifični toplinski kapacitet nekog materijala.

4.1.2.2. Prilagođeni provodni ravni izvor (MTPS metoda)

MTPS (engl. *Modified Transient Plane Source*) metoda je varijacija TPS metode, razvijena od strane Dr. Nancy Mathis-a. Uređaj rabi jednostrano sučelje sa toplinskim sensorom (**slika 4-4**) koji konstantno zagrijava uzorak. Razlika između metoda MTPS i TPS je ta da je grijaći element podržan na stražnjoj strani, što pruža mehaničku podršku, električnu i termalnu izolaciju. Ova modifikacija omogućuje jednostrano sučelje te pruža maksimalnu fleksibilnost pri mjerenju i testiranju tekućina, prahova, pasti i krutina.



Slika 4-4: MTPS senzor. Preuzeto s

http://en.m.wikipedia.org/wiki/Thermal_conductivity_measurement

4.1.2.3. Provodni linijski izvor (TLS metoda)

Fizički model koji stoji iza ove metode je beskonačni linijski izvor sa konstantnom snagom po jedinici duljine. Temperaturni profil $T(t,r)$ na udaljenosti r u vremenu t je kako slijedi:

$$T(t,r) = \frac{Q}{4\pi k} Ei\left(\frac{r^2}{4at}\right), \quad \text{(jednadžba 4-2)}$$

gdje su:

Q - je snaga po jedinici dužine u W m^{-1} ,

k - je toplinska provodljivost uzorka u $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$,

$Ei(x)$ - je eksponencijalni integral, transcendentna matematička funkcija,

r - je radijalna udaljenost do linijskog izvora,

a - je toplinska difuzivnost u m^2s^{-1} ,

t - je vrijeme koje je proteklo od kad je grijane počelo u s.

Kad se izvodi eksperiment, mjeri se temperatura na fiksnoj udaljenosti i prati se ta temperatura u danom vremenu. Za velika vremena, eksponencijalni integral može biti aproksimiran upotrebom jednadžbe (4-3):

$$Ei(x) = -\gamma - \ln(x) + O(x^2) \quad \text{(jednadžba 4-3)}$$

gdje je:

$\gamma \sim 0,577$ Eulerova gamma konstanta.

To dovodi do izraza (4-4):

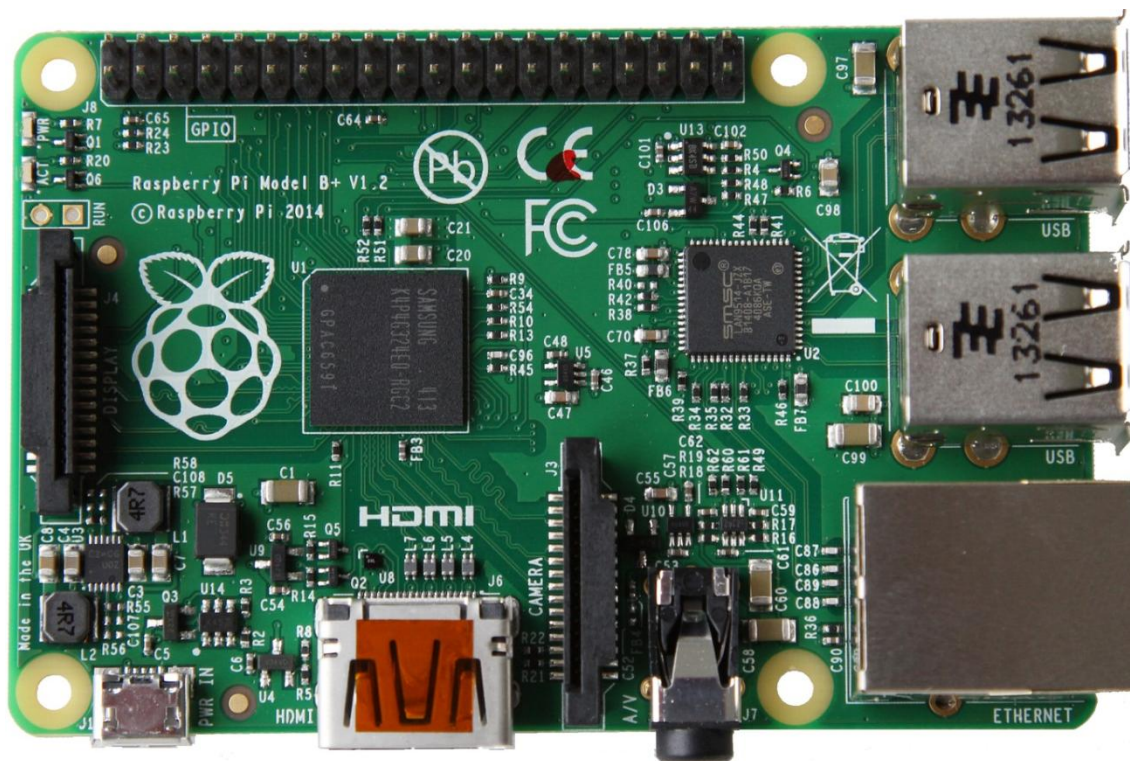
$$T(t,r) = \frac{Q}{4\pi k} \left\{ -\gamma - \ln\left(\frac{r^2}{4at}\right) + \ln(t) \right\} \quad \text{(jednadžba 4-4)}$$

Treba primijetiti da su prva dva pojma u zagradi su konstante. Tako da ako je temperatura senzora iscrtana naspram prirodnog logaritma vremena, toplinska provodljivost može biti dobivena iz nagiba danog znanjem od Q . Tipično to znači da treba ignorirati prvih 60 do 120 sekundi podataka te mjeriti od 600 do 1200 sekundi.

5. Eksperimentalna oprema i mjerni programi

5.1. Raspberry Pi (model B+)

Raspberry Pi (skr. RasPi) je jeftino računalo (25-35 USD) veličine kreditne kartice (**slika 5.1**) koje se priključi na računalni monitor ili TV, i koristi tipkovnicu i miša. Ono se najčešće pogoni Linux distribucijama (Raspbian je najčešća) te se lako programira za razne U/I jedinice, a često služi i kao medijski poslužitelj. Sposoban je učiniti gotovo sve što bi očekivali od stolnog računala, od surfanja internetom i reproduciranja (ponekad visoko razlučivog) videa, do izradbe tablica, obradbe riječi i igranja igrica.



Slika 5-1: Matična ploča i mikrokontroleri Raspberry Pi-ja, model B+ (izvor: https://www.raspberrypi.org/wp-content/uploads/2014/07/rsz_b-.jpg)

5.2. Toplinski digitalni senzor DS18B20

Raspberry Pi je posebno pogodan za bilježenje podataka. Pri tomu je temperatura vrlo popularna mjerna varijabla. Temperaturni senzor DS18B20 je relativno jeftin senzor koji temperaturu pretvara u digitalni zapis. Ti podaci mogu se poslati RasPi računalu koje može zabilježiti te vrijednosti u ovisnosti o vremenu. Bez dodatne kalibracije, dovoljno je precizan za većinu primjena. Može mjeriti temperature od -55 do 125 °C, s razlučivošću od 9 do 12 bita, uz preciznost od 0,5 °C tijekom većine mjenog opsega (**Bannon, 2014**).

Senzor se vrlo lako spaja na RasPi preko GPIO ulaza (engl. *General Purpose Input/Output*). Namjena svih konektora na pločici RasPi-ja je različita, a u načelu GPIO ulaz služi za primanje i odašiljanje digitalnih signala između RasPi i periferinih uređaja. Shema GPIO pinova prikazana je na **slici 5-2**. Pri tomu dva su načina uporabe i programiranja GPIO pinova. Jedan je GPIO brojčano označavanje, a drugo fizičko brojanje istih. Oba su prikazana na **slici 5-1**, a u ovome radu korišten je (i kod programskih kodova) drugi način, gdje su pin 1 i 2 smješteni u prvom retku i daju konstantan napon (3,3 i 5 V).

GPIO Numbers

Raspberry Pi B
Rev 1 P1 GPIO Header

	Pin No.		
3.3V	1	2	5V
GPIO0	3	4	5V
GPIO1	5	6	GND
GPIO4	7	8	GPIO14
GND	9	10	GPIO15
GPIO17	11	12	GPIO18
GPIO21	13	14	GND
GPIO22	15	16	GPIO23
3.3V	17	18	GPIO24
GPIO10	19	20	GND
GPIO9	21	22	GPIO25
GPIO11	23	24	GPIO8
GND	25	26	GPIO7

Raspberry Pi A/B
Rev 2 P1 GPIO Header

	Pin No.		
3.3V	1	2	5V
GPIO2	3	4	5V
GPIO3	5	6	GND
GPIO4	7	8	GPIO14
GND	9	10	GPIO15
GPIO17	11	12	GPIO18
GPIO27	13	14	GND
GPIO22	15	16	GPIO23
3.3V	17	18	GPIO24
GPIO10	19	20	GND
GPIO9	21	22	GPIO25
GPIO11	23	24	GPIO8
GND	25	26	GPIO7

Raspberry Pi B+
B+ J8 GPIO Header

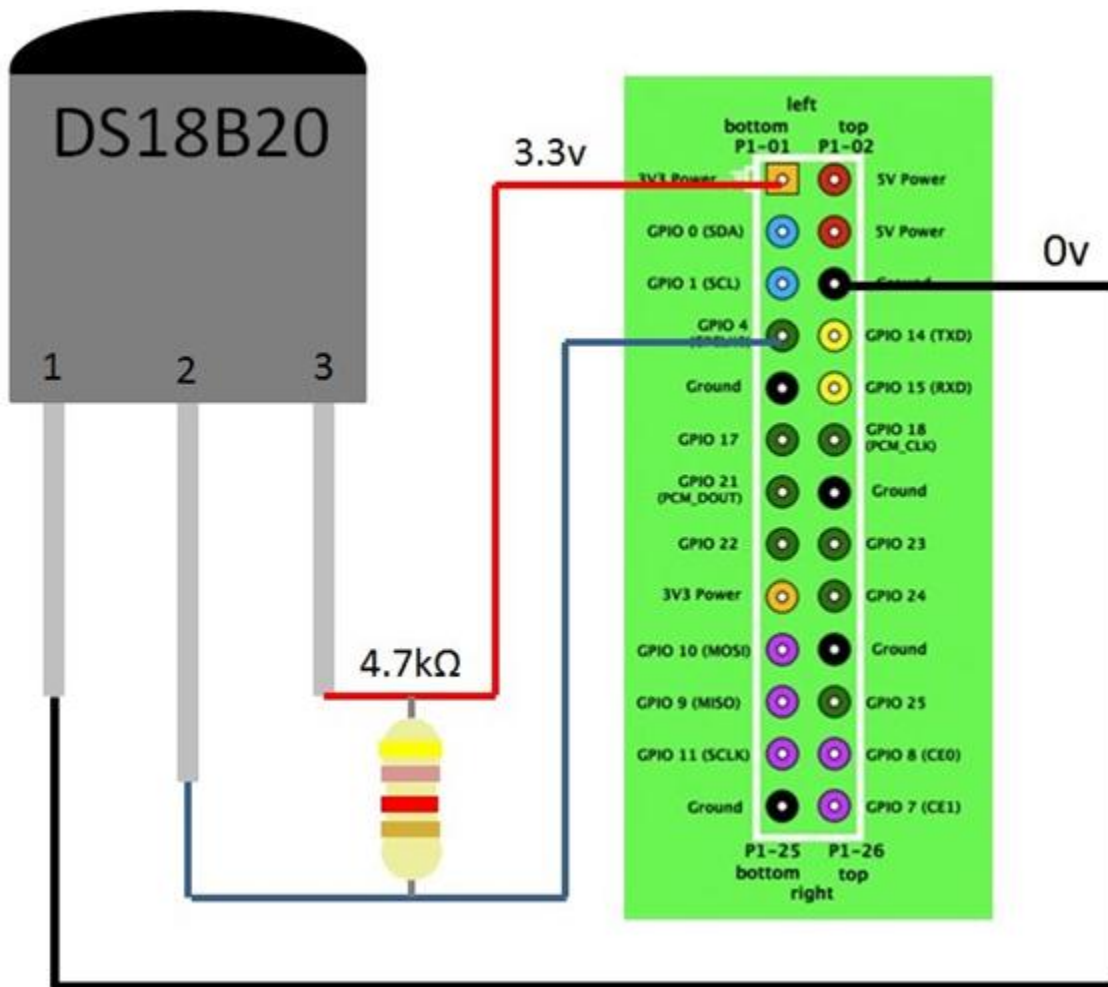
	Pin No.		
3.3V	1	2	5V
GPIO2	3	4	5V
GPIO3	5	6	GND
GPIO4	7	8	GPIO14
GND	9	10	GPIO15
GPIO17	11	12	GPIO18
GPIO27	13	14	GND
GPIO22	15	16	GPIO23
3.3V	17	18	GPIO24
GPIO10	19	20	GND
GPIO9	21	22	GPIO25
GPIO11	23	24	GPIO8
GND	25	26	GPIO7
DNC	27	28	DNC
GPIO5	29	30	GND
GPIO6	31	32	GPIO12
GPIO13	33	34	GND
GPIO19	35	36	GPIO16
GPIO26	37	38	GPIO20
GND	39	40	GPIO21

Key

Power +	UART
GND	SPI
I ² C	GPIO

Slika 5-2: označavanje i numeracija pinova na GPIO pinovima RasPi-ja. Model B+ je prikazan kao desna shema. Preuzeto s <http://raspi.tv/2014/rpi-gpio-quick-reference-updated-for-raspberry-pi-b>.

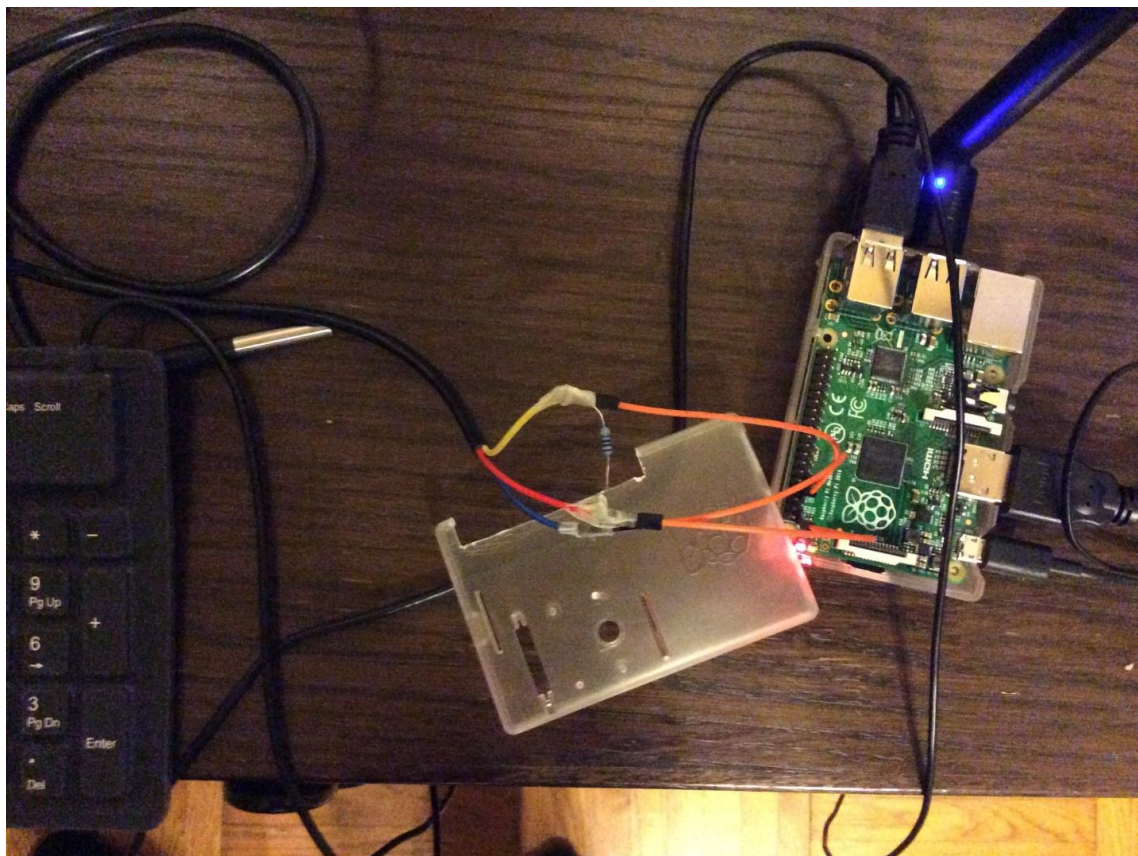
Temperaturni senzor minimalno koristi dvije žice (naponsku i podatkovnu), dok je mjerenje znatno pouzdanije uz tri žice (uzemljenje). Takav spoj korišten je u eksperimentu. Po potrebi moguće je paralelno spojiti više senzora. Podatkovni i naponski signal moraju biti premošćeni otpornikom od 4,7 kΩ zbog regulacije dolaznog napona. Senzor troši vrlo malo struje, ne približavajući se limitu od 50 mA ukupne struje koja može biti dana preko svih aktivnih pinova prema vanjskim uređajima, te dodajući samo malo dodatnog opterećenja Raspberry Pi-u. Senzor DS18B20 može se spojiti na nekoliko načina s GPIO (ovisno koji se pin koristi za uzemljenje i podatke, a čak se i naponski može prebaciti na programibilni gdje se 3,3 V šalje naredbom). Jedan od načina prikazan je na **slici 5-3**:



Slika 5-3: Način spajanja senzora DS18B20 na GPIO RasPi modela B+. Kao podatkovni i pin za uzemljenje mogu se koristiti bilo koji s tom ulogom, a ovdje su odabrani pin 6 i 7. Preuzeto s <https://www.raspberrypi.org/forums/viewtopic.php?f=29&t=83282>.

5.3. Praktično spajanje RasPi i DS18B20 te probno mjerenje temperature okoliša

Prikaz radnog modela RasPi-ja na koji je spojen temperaturni senzor dan je na **slici 5-4**. Lako je zamijetiti vezu triju žica na GPIO, kućište prilagođeno pristupu sabirnici, sam senzor, te sve ostale potrebne periferne jedinice.



Slika 5-4: Sastavljena konfiguracija RasPi, WiFi antene, senzora i tipkovnice. Narančastim žicama povezan je senzor i GPIO, a između naponske (crvene) i podatkovne (žute) žice vidi se otpornik od 4,7 k Ω .

5.4. Programska podrška za temperaturni senzor unutar Raspbiana

Mjerenje temperature, ali i pristup bilo kojim vanjskim podacima preko GPIO-a, na RasPi-ju moguće je načiniti na sljedeće načine:

1. Izravnim unosom Linux naredbi unutar terminala Raspiana (tzv. „shell“), što je brži način;
2. Pisanjem skripte unutar Raspiana koja se može snimiti i kasnije izvoditi kao Linux program, što je prvi način programiranja, izravniji, no za korisnika teži zbog oskudnije sintakse jezika;
3. Programiranjem unutar Pythona, koji kao programski jezik (interpreter) dopušta stvaranje složenijeg koda, no i zahtijeva više vremena te oblikovanja programa.

Ovdje su prikazana sva tri primjera, koja su ujedno i isprobana, dok je mjerenje u konačnici načinjeno metodom 2.

5.4.1. Opažanje sonde u Raspianu, aktiviranje kanala i očitavanje temperature

Prva radna konfiguracija isprobana je mjerenjem temperature prostora u kojem je senzor smješten, jednostavnim pozivanjem kanala i jednokratnim očitavanjem temperature. Kod čitanja signala senzora nužno je pozvati dva Raspbian jezgrena (kernel) potprograma nazvana „w1-gpio“ i „w1-therm“ (npr. **Bannon, 2014**). Oni se preko LXTerminala pozivaju naredbenim retcima:

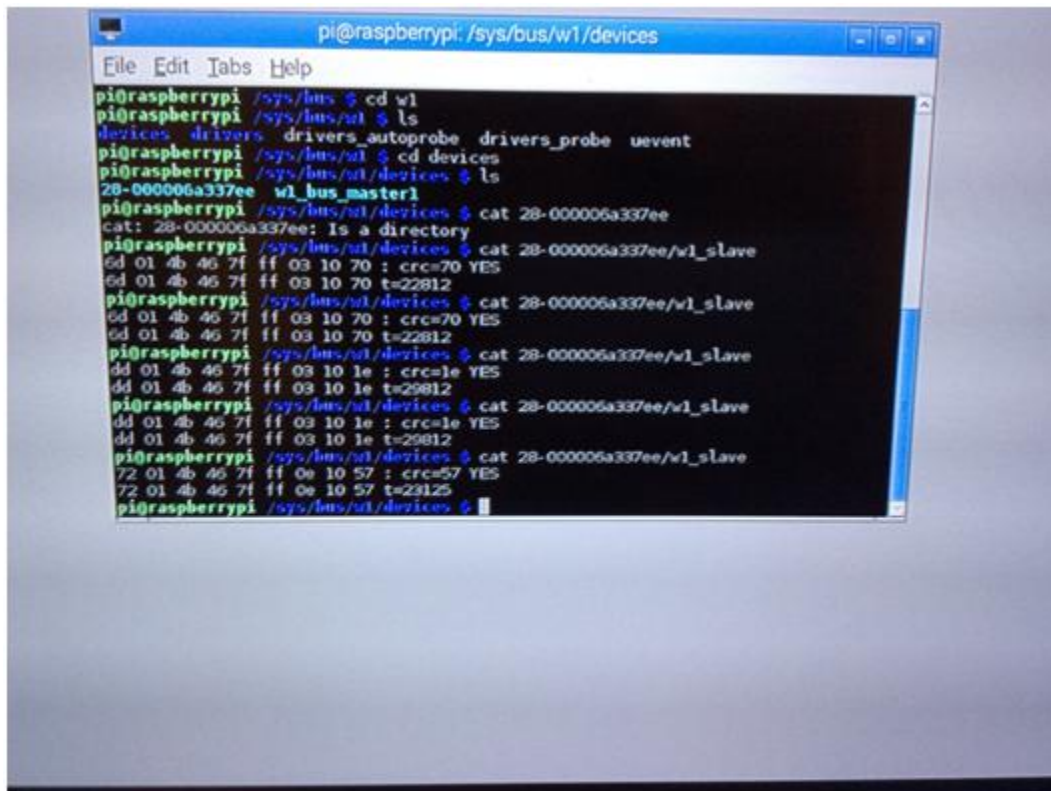
```
sudo modprobe w1-gpio
sudo modprobe w1-therm
```

Ako nije prijavljena pogreška tada su programski moduli uspješno učitani te su stvoreni direktoriji unutar Raspiana na adresi 'sys/bus/w1/devices', i to po jedan za svaki spojeni senzor. Kao primjer u ovom slučaju oznaka senzora je 28-000006a337ee (**slika 5-5**) te je takav direktorij kreiran unutar /sys/bus/w1/devices. Vrijednost trenutne temperature na senzoru čija je oznaka poznata dobiva se uporabom:

```
cat/sys/bus/w1/devices/28-000006a337ee/w1_slave
```

U slučaju da je očitana temperatura 23,125 °C, ta vrijednost bi se prikazala kao:

```
xx 014b 46 7f ff xx xx xx t=23125 (slika 5-5).
```



```
pi@raspberrypi: /sys/bus/w1/devices
File Edit Tabs Help
pi@raspberrypi /sys/bus $ cd w1
pi@raspberrypi /sys/bus/w1 $ ls
devices drivers drivers_autoprobe drivers_probe uevent
pi@raspberrypi /sys/bus/w1 $ cd devices
pi@raspberrypi /sys/bus/w1/devices $ ls
28-000006a337ee w1_bus_master1
pi@raspberrypi /sys/bus/w1/devices $ cat 28-000006a337ee
cat: 28-000006a337ee: Is a directory
pi@raspberrypi /sys/bus/w1/devices $ cat 28-000006a337ee/w1_slave
6d 01 4b 46 7f ff 03 10 70 : crc=70 YES
6d 01 4b 46 7f ff 03 10 70 t=22812
pi@raspberrypi /sys/bus/w1/devices $ cat 28-000006a337ee/w1_slave
6d 01 4b 46 7f ff 03 10 70 : crc=70 YES
6d 01 4b 46 7f ff 03 10 70 t=22812
pi@raspberrypi /sys/bus/w1/devices $ cat 28-000006a337ee/w1_slave
dd 01 4b 46 7f ff 03 10 1e : crc=1e YES
dd 01 4b 46 7f ff 03 10 1e t=29812
pi@raspberrypi /sys/bus/w1/devices $ cat 28-000006a337ee/w1_slave
dd 01 4b 46 7f ff 03 10 1e : crc=1e YES
dd 01 4b 46 7f ff 03 10 1e t=29812
pi@raspberrypi /sys/bus/w1/devices $ cat 28-000006a337ee/w1_slave
72 01 4b 46 7f ff 0e 10 57 : crc=57 YES
72 01 4b 46 7f ff 0e 10 57 t=29125
pi@raspberrypi /sys/bus/w1/devices $
```

Slika 5-5: Izravno očitavanje vrijednosti temperature senzora unutar LXTerminala (Raspiana)

5.4.2. Mjerenje temperature u vremenskoj petlji u Raspian «shell» skripti

Upravo je ovaj način uporabljen za eksperiment. Načinjena je skripta čiji je ispis (engl. *listing*) niže prikazan rabeći naredbe samoga Raspiana. Ona kombinira pristup pinovima na koji je spojen senzor te dodatno GPIO18 (pin 12) na koji je dodana crvena led žaruljica. Programski je određeno da početak mjerenja označava paljene te led diode, a njegov završetak njezino gašenje. Mjerni interval je 5 sekundi i u tom vremenu se na disk sprema po jedan redak u zapis «date.txt» u kojemu su spremljeni vrijeme i datum mjerenja te očitana temperatura. Ispis glasi:

```
#!/bin/bash
```



```

timestamp=$(date)
echo "Početni datum:" $timestamp > date.txt

# aktiviranje LEDa na GPIO18 (pin 12)
echo "18" > /sys/class/gpio/export
echo "out" > /sys/class/gpio/gpio18/direction
echo "1" > /sys/class/gpio/gpio18/value

for i in {1..2}
do
    # ispis datuma
    date
    # spremanje datuma u datoteku
    echo "Datum:" $(date) >> date.txt

    # očitavanje temp. procesora
    vcgencmd measure_temp
    tempin=$(vcgencmd measure_temp)

    # spremanje temp. CPU u datoteku
    echo "Unutarnja temperatura:" $tempin >> date.txt

    # očitavanje broja i temperature sonde
    cat /sys/bus/w1/devices/28-000006a337ee/w1_slave

    # spremanje gornjega očitavanja u varijablu
    var=$(cat /sys/bus/w1/devices/28-000006a337ee/w1_slave)

    # ispis dijela zapisa samo s temp. sonde
    echo $var | cut -c68-74

    # spemanju temp. sonde u datoteku
    echo "Vanjska temperatura:" >> date.txt
    echo $var | cut -c68-74 >> date.txt

    var2=$(echo $var | cut -c68-74)
    dec=100

```

```
var3=$(echo $var2/100)
echo $var3 "oC"
```

```
# 5 sekundi pauze do novoga očitavanja
sleep 5
```

done

```
# Gašenje GPIO18 pina
echo "0" /sys/class/gpio/gpio18/value
echo "18" > /sys/class/gpio/unexport
```

5.4.3. Mjerenje temperature sondom u Pythonu

Vrijednosti temperature moguće je očitavati pozivanjem programa u Pythonu (**Bannon, 2014**). Kako potprogrami za podršku temperaturnom senzoru (gpio i wtherm) nisu sastavni dio Raspiana nakon njegova učitavanja, oni su u kod dodani kao uvodni modul.

```
#!/usr/bin/env python
import os, time, sys
dev_dir = '/sys/bus/w1/devices/'
def load_modules():
    first_time = 0
    if os.getuid() == 0: # Only root can load the mods
        if os.system('modprobe -first-time -q w1-gpio') == 0:
            first_time = 1
        if os.system('modprobe -first-time -q w1-therm') == 0:
            first_time = 1
    if first_time: # wait a bit for the devs to be populated
        time.sleep(5)
    return first_time
else:
    if os.system('modprobe -q w1-gpio') == 256 or os.system('modprobe -q w1-therm') == 256:
        print 'sorry, modules not loaded and we are not root'
        sys.exit(1)
def read_temp_lines(dev):
    # Note that the read process is slow, bit less then
```

```

# a second per device.
try:
    f = open(dev_dir + dev + '/wl_slave', 'r')
    content = f.readlines()
    f.close()
except IOError:
    lines = ['no file']
return content

def read_temps():
    # Build a tuple with date from each device we know
    # about, set the ones that are not present to 0.0
    results = []
    for dev in devices:
        content = read_temp_lines(dev)
        if content == ['no file']:
            results.append(0.0)
            continue
        while content [0] .find('YES') == -1:
            # try again if dev was not ready
            time.sleep(0.1)
            content = read_temp_lines(dev)
        temp_start = content[1] .find('t=')
        if temp_start != -1:
            temp_string = content[1][temp_start+2:]
            results.append(float(temp_string) / 1000.0)
    return results

load_modules()
devices = os.listdir(dev_dir)
devices.remove('wl_bus_master1')
print read_temps()

```

Prikazani program uredno očitava trenutačnu temperaturu. Kako bi se nastavilo s neprekinutim očitavanjem temperatura, `read_temps()` funkcija treba biti pozvana više puta unutar petlje. Program se sastoji od tri funkcije (**Bannon, 2014**), takve da se njihovi dijelovi lako mogu upotrijebiti za druge programe. Funkcija `load_modules()` provjerava da li su jezgri moduli

učitani ili da ih pokuša učitati ako je potrebno. Funkcija `read_temp_lines()` pristupa virtualnim datotekama povezanim sa temperaturnim senzorima i vraća vrijednosti pohranjene u datotekama. Na kraju, `read_temps()` funkcija analizira izlazni tekst i vraća temperaturne vrijednosti. Funkcija `read_temps()` može biti opozvana kada jezgra ažurira datoteku podataka senzora. Ako se ovo dogodi, funkcija čeka desetinku sekunde i pokuša ponovno. Funkcija također nije osjetljiva na iskapčanje senzora. Program treba učiniti izvršnim i pokrenuti ga utipkavajući:

```
sudo ./ime_zapisa.py
```

5.4.4. Podizanje VNC poslužitelja pri pokretanju RasPi-ja

Ova metoda će raditi samo ako je RasPi podešen tako da se automatski prijavi na radno (engl. *desktop*) okruženje. Spajanje na RasPi pomoću VNC (engl. *Virtual Network Computing*) poslužitelja je dobro pod uvjetom da RasPi ne izvrši ponovno pokretanje sustava. Ako to učini, onda se mora ili spojiti sa SSH-om (engl. *secure shell*) i ponovno pokrenuti VNC poslužitelj ili urediti tako da se VNC poslužitelj automatski pokrene nakon što RasPi pokrene ponovno pokretanje sustava.

Postoji nekoliko različitih metoda uređivanja kodova da se pokrenu istovremeno kada se RasPi pokrene. Metoda opisana ispod je vjerojatno najlakša za primjenu. Može ju se prilagoditi za pokretanje drugih zapovjedi umjesto pokretanja VNC poslužitelja.

Korak 1.

Potrebno je pokrenuti terminalnu sesiju na RasPi, ili se spojiti pomoću SSH-a. Nova terminalna ili SSH-a sesija će se automatski pokrenuti u vlastitom „kućnom“ direktoriju `/home/pi`. Ako nismo u ovom direktoriju, treba ga promijeniti tako da se upiše: `$ cd /home/pi`. Zatim `cd` u `.config` direktorij upisujući: `$ cd .config`. treba zamijetiti `.` na početku naziva mape. To ga čini skrivenim direktorijom koji se neće pojaviti kada se upiše `'ls'`.

Korak 2.

Potrebno je zadati naredbu `$ mkdir autostart` da bi se stvorio novi direktorij unutar `.config` zvan `'autostart'`. `cd` unutar tog novog direktorija upisujući: `$ cd autostart`.

Korak 3.

Sve što preostaje je da se uredi nova konfiguracijska datoteka. Zato je potrebno napisati sljedeću zapovijed da bi se otvorio nano uređivač teksta u novoj datoteci: `$ nano tightvnc.desktop`. Sadržaj datoteke se uredi pomoću sljedećeg teksta:

```
[DesktopEntry]
Type=Application
Name=TightVNC
Exec=vncserver:1
StartupNotify=false
```

Zatim se upiše `ctrl-X` i onda `Y` da bi se spremile promijene na datoteci. Sljedeći put prilikom ponovnog pokretanja VNC poslužitelj će se automatski ponovno pokrenuti. Time će biti moguće RasPi-ju pristupiti izravno s drugog računala koje će time preuzeti ulogu ekrana i tipkovnice, dok je na RasPi dovoljno spojiti izvor napajanja i mjernu opremu.

U prikazanom eksperimentu kao terminal korišten je prijenosnik, točnije MacBook iz 2008. godine s OSX sustavom. Također, tijekom probnoga razdoblja uspješno je iskušano napajanje RasPi-ja isključivo preko baterijskog napajanja što je omogućilo autonomiju mjerenja neovisno od nepokretnog izvora struja u trajanju nešto dužem od 60 minuta. Veza između MacBook-a i RasPi-ja ostvarena je mobilnom internetskom vezom koja je podržavala dovoljnu brzinu tijekom cijelog eksperimenta.

6. Mjerenje toplinske vodljivosti

Prije samog mjerenja bilo je potrebno odrediti volumen svakog uzorka. To je i učinjeno vaganjem svakog uzorka čime su dobivene mase uzoraka. Masa prvog uzorka (**slika 6-1**) iznosi $m_1 = 5374,4$ grama, a masa drugog uzorka (**slika 6-2**) iznosi $m_2 = 3283,6$ grama. Gustoća uzoraka je standardna gustoća za vapnenac i ona iznosi $\rho(\text{vapnenac}) = 2,3 \text{ g/cm}^3$. Zatim je volumen svakog uzorka izračunat množenjem mase i gustoće. Za provjeru volumena još je učinjeno uranjanje svakog uzorka u poznatu količinu vode i mjerenje razine istisnute vode. Takvim načinom dobiveni su volumeni uzoraka $V_1 = 2336,7 \text{ cm}^3$ i $V_2 = 1427,6 \text{ cm}^3$. Nakon tih početnih mjerenja mase i volumena moglo se krenuti sa eksperimentalnim dijelom koji se izvodio na dva načina: mjerenjem na načelu otapanja leda do sobne temperature i na načelu grijanja vode do kipljenja.



Slika 6-1: Uzorak vapnenca broj 1



Slika 6-2: Uzorak vapnenca broj 2

6.1. Mjerenje na načelu otapanja leda do sobne temperature

Mjerenje na načelu otapanja leda do sobne temperature izgleda tako da se u rupu na uzorku, koja je odmah nakon uzorkovanja probušena s bušilicom, stavi količina leda dovoljna da ispuni rupu. Zatim se u rupu, zajedno s ledom, stavi temperaturni senzor (**slika 6-3**) koji je spojen na RasPi i počne se mjeriti temperatura. Mjerenje se završilo kada je temperatura u rupi dosegla temperaturu okoline (sobnu temperaturu), tj. kada se temperatura prestala znatno mijenjati s vremenom.

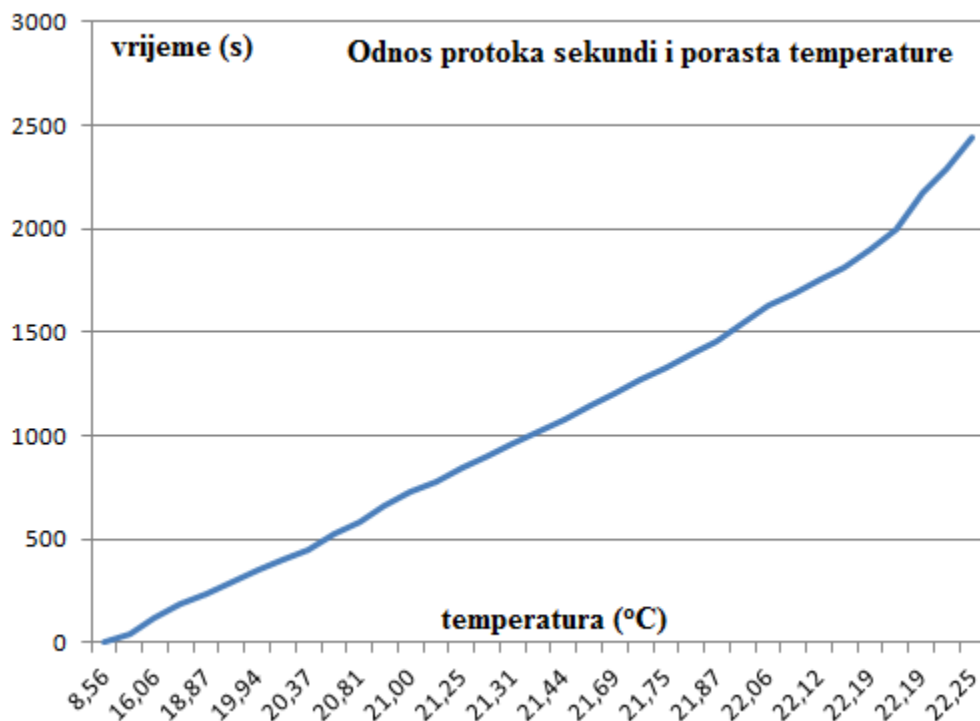


Slika 6-3: Mjerenje temperature na načelu otapanja leda do sobne temperature na uzorku br.2

Tablica 6-1: Rezultati mjerenja na načelu otapanja leda do sobne temperature

Vrijeme (s)	Temperatura (°C)	Vrijeme (s)	Temperatura (°C)	Vrijeme (s)	Temperatura (°C)	Vrijeme (s)	Temperatura (°C)
0	8,56	530	20,62	1081	21,44	1689	22,06
42	10,62	586	20,81	1144	21,50	1752	22,12
123	16,06	657	20,94	1207	21,69	1815	22,12
183	17,94	726	21,00	1269	21,69	1898	22,19
238	18,87	782	21,12	1333	21,75	2001	22,19
294	19,56	847	21,25	1396	21,81	2172	22,19
349	19,94	906	21,31	1458	21,87	2289	22,23
404	20,19	957	21,31	1542	22,00	2438	22,25
446	20,37	1019	21,44	1626	22,06	-	stabilizacija

Kao što se može vidjeti iz **tablice 6-1** vrijeme koje je potrebno za stabilizaciju temperature od 8,56 °C na 22,25 °C je 40 minuta i 37 sekundi, tj. do stabilizacije temperature proteklo je 2438 sekundi.



Slika 6-4: Krivulja mjerenja na načelu otapanja leda do sobne temperature za uzorak br. 2

Na krivulji mjerenja na načelu otapanja leda do sobne temperature (**slika 6-4**) možemo vidjeti da je porast temperature linearan. Ovaj eksperiment je izveden prvenstveno s namjenom da isproba ispravnost mjerne opreme i programskog koda. Glede uporabe tih podataka u izračunu toplinskih varijabli uzorka, već pri osmišljavanju postupka bilo je jasno da su volumeni leda premali u odnosu na stijenu kako bi se njegovim otapanjem moglo zaključiti koliki je toplinski tok iz stijene u led.

6.2. Mjerenje na načelu grijanja vode do kipljenja

Mjerenje na načelu grijanja vode do kipljenja izgleda tako da se uzorak stavi u lonac s vodom, gdje je dio uzorka s rupom izvan vode kako bi se nesmetano mogla mjeriti promjena

temperature u rupi. Lonac s vodom i uzorak su stavljeni na prijenosno kuhalo gdje se voda počela zagrijavati i krenulo je mjerenje (**slika 6-4**). Toplinski senzor je osiguran sa papirnatim ubrusom kako ne bi došlo do ispadanja senzora iz rupe ili do prelijevana i prskanja kipuće vode u rupu.

Prednosti takve metode u odnosu na prethodno opisanu su:

- volumeni i mase oba medija (stijene i vode) su usporedivi,
- porast temperature do trenutka stabilizacije u hladnijem mediju (stijeni) je veći,
- volumen rupe sa senzorom je ispunjen relativno malim volumenom zraka koji ne utječe značajno na prijenos topline sa stijene na senzor.



Slika 6-5: Mjerenje temperature na načelu grijanja vode do kipljenja na uzorku br. 2

Ekspiriment je trajao 27 minuta i 25 sekundi a porast temperature koji se dogodio u vremenu trajanja eksperimeta je s 24 °C na 96 °C u vodi (kada je u nju umetnuta stijena), tj. zabilježen je

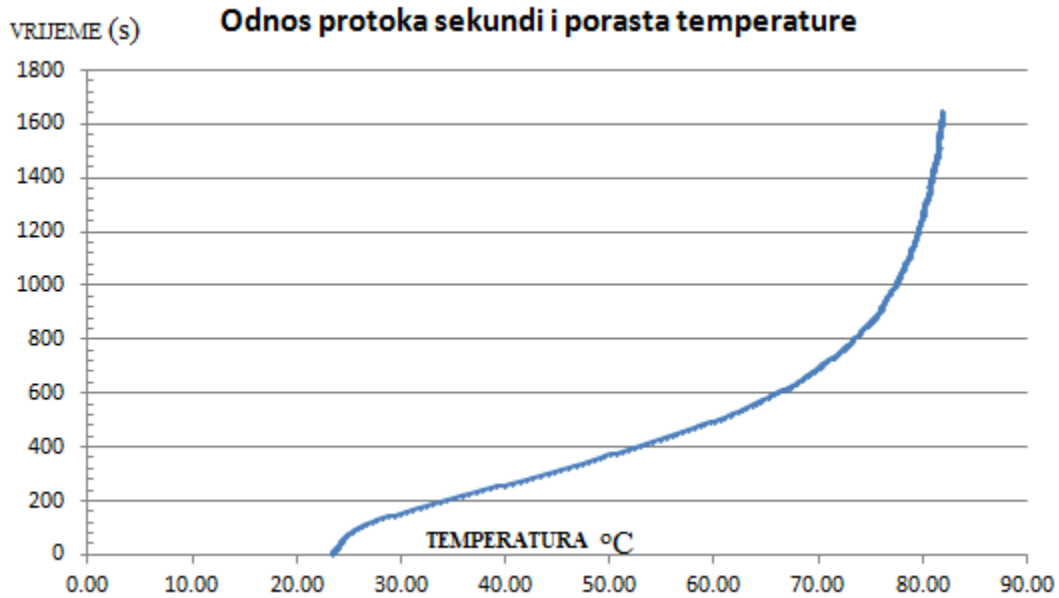
porast temperature od 72 °C za vodu. U stijeni je zabilježen porast temperature s 24 °C na 92 °C, tj. zabilježen je porast temperature od 68 °C (**tablica 6-2**).

Tablica 6-2: Rezultati mjerenja na načelu grijanja vode do kipljenja

Vrijeme (s)	Temperatura (°C)	Vrijeme (s)	Temperatura (°C)	Vrijeme (s)	Temperatura (°C)	Vrijeme (s)	Temperatura (°C)
0	23,44	420	54,13	861	74,88	1302	80,25
35	24,00	469	58,06	910	76,00	1351	80,69
84	25,25	518	61,44	959	76,69	1400	80,88
133	28,19	567	64,31	1008	77,50	1449	81,13
182	32,38	616	66,81	1057	78,13	1498	81,50
231	37,13	665	68,94	1106	78,69	1547	81,56
273	41,31	714	70,75	1155	79,13	1596	81,75
322	46,00	763	72,38	1204	79,56	1631	81,88
371	50,00	812	73,81	1253	80,00	-	stabilizacija

Kao što se može vidjeti iz **tablice 6-2**, vrijeme potrebno za stabilizaciju temperature od 23,44 °C na 81,88 °C je 27 minuta i 7 sekundi, tj. do stabilizacije temperature proteklo je 1631 sekundi.

Na krivulji mjerenja na **slici 6-6** vidljivo je kako je na početku mjerenja (23,44 °C) bilježen nagli porast temperature, da bi zatim od 29 °C temperatura linearno rasla do 70 °C i zatim nakon 75 °C dolazi do ponovnog naglog rasta temperature.



Slika 6-6: Krivulja mjerenja na načelu grijanja vode do kipljenja za uzorak br. 2

6.3. Proračun vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta

Prvi proračun je načinjen prema jednadžbi (6-1) koju je dao **Bailey (1997)**:

$$\frac{c_p(\text{sample})}{c_p(\text{water})} = \frac{(\text{mass} \times \Delta T)_{\text{water}}}{(\text{mass} \times \Delta T)_{\text{sample}}} = S.H.(\text{sample}) \quad \text{(jednadžba 6-1)}$$

gdje su:

$c_p(\text{sample})$ = teorijski toplinski kapacitet uzorka (J / °C g),

$c_p(\text{water})$ = teorijski toplinski kapacitet vode (J / °C g),

$S.H.$ = specifični toplinski kapacitet uzorka, relativna vrijednost u odnosu na vodu, bezdimenzionalna veličina.

Račun se, prema **jednadžbi (6-1)**, može načiniti ako se poznaju mase uzorka i promjena temperature u njima tijekom eksperimenta, što je u ovome slučaju poznato. Tada se specifični toplinski kapacitet uzorka stijene može odrediti ako se izdvoji dio prethodne jednadžbe u kraći izraz:

$$\frac{(mass \times \Delta T)_{water}}{(mass \times \Delta T)_{sample}}$$

(jednadžba 6-2)

$$\frac{(mass \times \Delta T)_{water}}{(mass \times \Delta T)_{sample}} = (3 \text{ l} \times 72 \text{ }^\circ\text{C}) / (3,28 \text{ kg} \times 68 \text{ }^\circ\text{C}) = 216 / 223,04 = 0,968$$

S obzirom da teorijska vrijednost specifičnog toplinskog kapaciteta vapnenca iznosi 0,886 J/g K (**tablica 7-1**) može se reći da je izračunata vrijednost od 0,904 J/g K vrlo bliska teorijskoj, uz napomenu da i „teorijske“ vrijednosti na određenim temperaturama znaju varirati ovisno od izvora. Ovim rezultatom možemo potvrditi da mjerenje pomoću temperaturnog senzora i Raspberry Pi-ja svakako može biti korišteno u budućnosti kao jedna od mjernih metoda za određivanje temperaturnih svojstava stijena i ostalih materijala.

Međutim, ako se na vrijednost primijeni korigirajući faktor za koji xxx predlažu 0,84 za vapnenac s vodom u porama (te 0,78 za zrak u šupljinama) dolazi se do vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta od 0,759. Iako zasićenje fluidom u porama nije određeno i radilo se o suhom uzorku, zbog trajanja eksperimenta i temperature pretpostavilo se kako je veći dio uzorka bio na kraju zasićen vrućom vodom.

6.4. Proračun vrijednosti toplinskog kapaciteta

Toplinski kapacitet (Q) teorijska je vrijednost koja opisuje koliko je topline može biti preneseno iz jednog sustava u drugi. Opisan je izrazom: (**6-3**):

$$Q = C_p \times m \times \Delta T ,$$

(jednadžba 6-3)

gdje su:

Q – toplinski kapacitet (J),

C_p – specifični toplinski kapacitet uzorka (J/kg K),

m – masa uzorka (kg),

Δt – promjena u temperaturi (K).

Ako se prihvati da se izračun toplinskog kapaciteta može načiniti sa specifičnom toplinskom vrijednošću dobivenom ranije od 0,904 J/gK lako je račun nastaviti. Napomena: rekurzivnost ovoga računa je samo pretpostavljena. Tada se dobiva sljedeća vrijednost:

$$Q = 0,904 \text{ (J / g K)} \times 3280 \text{ (g)} \times 331,6 \text{ (K)} = 963656,128 \text{ J} = 963,66 \text{ kJ}$$

Upravo je to količina topline za koju smo pretpostavili da je prenesena tijekom eksperimenta iz vode na temperaturi od 96 °C kroz stijenu do senzora. Pri tomu treba napomenuti kako se volumen i tlak nisu mijenjali, što je kod stijena razumljivo, no kod ispitivanja plinova i tekućina takvi eksperimenti mogu imati vrlo promjenjive te veličine. Međutim i kod stijena ima jedna termodinamička varijabla čijom se promjenom mijenja i vrijednost toplinskog kapaciteta. To je sama temperatura sustava koja je ovdje aproksimirana u jednadžbama vrijednošću od 100 °C.

7. Diskusija

Mjerenja specifičnog toplinskog kapaciteta (engl. *specific heat capacity*) vapnenaca i njegove promjene s temperaturom (npr. **Gaal & Gaal, 2010**) ovise o sastavu uzorka stijene te činjenici je li prilikom mjerenja bio u kontaktu sa zrakom, nekim drugim fluidom ili drugom stijenom. Također, mjerenje ovisi i o sastavu stijene, tj. količini dolomitne komponente u njoj, a neki autori su opazili i kako povećanje dolomitizacije izaziva i povećanje vodljivosti (npr. **Barin & Knacke, 1973**).

Sljedeće vezano termofizikalno svojstvo je toplinska vodljivost (engl. *thermal conductivity*) koja se (npr. **Clauser & Huenges, 1995**) može se mijenjati za faktor 2 kod svake litologije, a kao posljedica razlike u mineralnom sastavu, fizičkim svojstvima te dijageneze (posebice smanjenje šupljikavosti). Nadalje, svojstvo vodljivosti mijenja se, iako ne uvijek očito, ovisno o temperaturi. Tako su **Zoth & Hänel (1988)** objavili izraz (7-1) za izračun termalne vodljivosti stijena na visokim temperaturama, a koji glasi:

$$\lambda(T) = A + \frac{B}{(350+T)} \quad , \quad \text{(jednadžba 7-1)}$$

gdje su (**Birch & Clark, 1940a,b**):

A – koeficijent u vapnencu 0,13,

B- koeficijent u vapnencu 1073.

Nadalje, **Sass et al. (1992)** su izveli još jedan empirijski izraz kojim se opisuje veza sastava i toplinske vodljivosti, ovaj puta kristalinskih stijena, i to na nekoj višoj temperaturi *T* (uz onu poznatu na *T*=25 °C). Izraz (7-2) glasi:

$$\lambda_0 = \lambda_{25} \times \left[1,007 + 25 \times \left(0,0037 - \frac{0,0074}{\lambda_{25}} \right) \right] \quad \text{(jednadžba 7-2)}$$

Gaal & Gaal (2010) objavili su tablicu s vrijednostima specifičnog toplinskog kapaciteta, difuzivnosti i vodljivosti za vapnence (**tablica 7.1**), a koje mogu odstupati nekoliko postotaka u temperaturnom intervalu od sobne do temperature od 500 °C:

Tablica 7.1: Vrijednosti toplinskog kapaciteta, difuzivnosti i vodljivosti za vapnenca (Gaal & Gaal, 2010)

Temperatura (°C)	Toplinski kapacitet C_p (J/kgK 10^3)	Toplinska difuzivnost (m^2/s 10^6)	Toplinska vodljivost (W/mK)
100	0,886	0,873	2,095
200	0,998	0,658	1,779
300	1,059	0,518	1,486
400	1,113	0,443	1,334
500	1,155	0,388	1,215

Vidljivo je kako specifični toplinski kapacitet i toplinska difuzivnost vapnenaca rastu porastom temperature, ali se ne mijenja značajno malim varijacijama u sastavu stijene. Toplinska razgradnja (u CaO i CO₂) vapnenca kao stijene počinje na temperaturama većim od 900 °C.

8. Zaključak

Mjerenja toplinskih svojstava materijala (u ovom slučaju stijena) pomoću toplinskog senzora i Raspberry Pi-ja ima svojih prednosti i mana, no prednosti prevladavaju. Prednost je što je cijena svih komponenata razmjerno mala u usporedbi s ostalim uređajima koji se koriste u sličnu svrhu, rukovanje je jednostavno i praktično. Mane su što prilikom mjerenja na načine koji su opisani u prethodnim poglavljima treba uzeti u obzir mnogobrojne parametre koji utječu na izvođenje samog mjerenja i njih treba uvrstiti smisljeno i na prave načine u jednadžbe da bi se dobili što reprezentativniji rezultati. Prvenstveno nedostatak je što uzorak nije tako izoliran i modeliran da se smanji prijenos topline izravno s metalne grijače ploče u njegovoj bazi, te je gornja površina izložena zraku koji je na sobnoj temperaturi (tu je prednost što je toplinska vodljivost zraka manja od ostalih uporabljenih medija). Stoga se za buduće eksperimente ovakve vrste mogu dati sljedeće preporuke kod njegove pripreme:

1. Uzorci bi trebali biti izrezani u obliku izduženog valjka, tj. cilindra, gdje bi donja baza trebala biti minimalno moguća da se u odnosu na visinu masa takvoga tijela mora biti istoga reda veličine kao i masa medija u koji je uzorak uronjen.
2. Litološki, uzorak treba biti što homogeniji, tako da se ne računa prosječna vrijednost dviju ili više podvrsta stijenskih komponenti. To može biti problem kod lapora, dolomitičnih vapnenaca, glinovitih vapnenaca i sl.

Nadalje, izvedeni proračuni specifičnih toplinskih varijabli za uzeti uzorak te njihova usporedba s teorijskim (0,886 nasuprot 0,904 J/gK) pokazala je vrlo dobru podudarnost. To svrstava ovu metodu u one koje se mogu standardno primjenjivati u laboratorijskim ispitivanjima takve vrste, odnosno eksperimentima manje preciznostima kojima se mogu razlikovati pojedinačne podvrste stijena unutar jedne litološke vrste unutar skupina klastičnih i biogenih stijena.

9. Literatura

9.1. Objavljeni radovi

- BANNON, D. (2014): The MagPi, A Magazine for Raspberry Pi users. 29 – December 2014, 49 P.
- BAILEY, D., G. (1997): Heat capacity of minerals: a hands-on introduction to chemical thermodynamics. (In: Brady, J., Mogk, D. W. & Perkins, D., (editors), Teaching Mineralogy) a workbook published by the Mineralogical Society of America, 406 p.
- BARIN, I. & KNACKE, O. (1973): Thermochemical Properties of Inorganic Substances. Springer, Berlin, 181 p.
- BIRCH, F. & CLARK, H. (1940a): The thermal conductivity of rocks and its dependence upon temperature and composition Part I. Am. j. Sci., 238, 8, 529-558.
- BIRCH, F. & CLARK, H. (1940b): The thermal conductivity of rocks and its dependence upon temperature and composition Part I. Am. j. Sci., 238, 9, 615-635.
- BIRCH, F., SCHAIRER, J. F., SPICER, H. C. (1942): Handbook of physical constants. Geological Society of America. Special papers, No. 36
- BLACKWELL, D.D., STEELE, J.L. (1989): Thermal conductivity of sedimentary rocks: measurement and significance. (In: Naeser N. D. & McCulloch TH (editors), Thermal history of sedimentary basins) Springer, New York, 5–96-
- CHEKONIN, E., PARSHIN, A., PISSARENKO, D, POPOV, Y., ROMUSHKEVICH, R., SAFONOV, S., SPASENNYKH, M., CHERTENKOV, M. V. & STENIN, V. P. (2012): When Rocks Get Hot: Thermal Properties of Reservoir Rocks. Oilfield Review, 24, 3, 20-37.
- CLARK, S. P. Jr. (1966): Handbook of physical constants (revised edition). Geological Society of America, Memoir 97, 587 p.
- CLAUSER, C. & HUENGES, E. (1995): Thermal conductivity of rocks and minerals. (In: Ahrens, T. J., (editor), Rock Physics and Phase Relations: A Handbook of Physical Constants), American Geophysical Union, Reference Shelf 3, 105-125 pp, doi: 10.1029/RF003p0105.
- GAAL, D.S. & GAAL P.S. (2010): Thermal conductivity 24. A Tehnomic Publishing Company book, ISBN No. 1-56676-711-3, ISSN 0163-9005

- GRETENER, P. E. (1981): Geothermics: using temperature in hydrocarbon exploration. AAPG, Short Course Notes, 171 p.
- KAPPELMEYER, O. & HANEL, R. (1974): Geothermics with special reference to application. Gebrüder Borntræger, Geoexploration monographs, ser. 1, no. 4, Berlin-Stuttgart, 238 p.
- PETTIJOHN, F. J., POTTER, P. E. & SIEVER, R. (1972): Sand and Sandstones. Springer-Ver., New York–Heidelberg–Berlin, 615 p.
- ROBERTSON, E. C. (1979): Thermal conductivity of rocks. U.S. Geological Survey open file report, p. 79–356
- SASS, J. H., LACHENBRUCH, A. H., MUNROE, R. J., GREENE, G. W. & MOSES, T. H. Jr. (1971): Heat flow in the western United States. J Geophys Res, 76, 6376–6413.
- TIŠLJAR, J. (1994): Sedimentne stijene. Školska knjiga, Zagreb, 399 p.
- ZOTH, G. & HAENEL R. (1988): Appendix in Handbook of Terrestrial HeatFlow Density Determination, edited by R. Haenel, L. Rybach, and L. Stegena, pp. 449 – 466
- *** (1974): CRC Handbook on Chemistry and Physics. 55th Ed., CRC Press, Florid, 2279 p.

9.2. Internetske poveznice

- www.wikipedia.com
- <https://www.google.hr/maps>
- <https://www.raspberrypi.org>
- <http://raspi.tv>
- <http://pp-grabovaca.hr>