

ŠOLSKI CENTER LJUBLJANA

Višja strokovna šola

DIPLOMSKA NALOGA

Domen Šnuderl

Ljubljana, 2025

ŠOLSKI CENTER LJUBLJANA

Višja strokovna šola

DIPLOMSKA NALOGA

NEVTRONSKA
DIFUZIJA V VODI

Domen Šnuderl

Mentor – predavatelj:	pred. Anton Kokalj, univ. dipl. inž. el.
Mentor na raziskovalni instituciji:	prof. dr. Luka Snoj, Julijan Peric, mag. jedr. teh.
Raziskovalna institucija:	Inštitut Jožef Stefan – IJS F8
Lektorica:	Mija Čuk, univ. dipl. spl. jez.
Prevod v tuj jezik:	Domen Šnuderl
Kraj, leto izdaje:	Ljubljana, 2025

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani Domen Šnuderl, študent Višje strokovne šole Ljubljana,
avtor predloženega dela z naslovom Nevtronska difuzija v vodi,
pripravljenega v sodelovanju s svetovalcem, pred. Antonom Kokaljcem, univ. dipl. inž. el.,
in sosvetovalcem prof. dr. Luko Snojem, Julijanom Pericem, mag. jedr. teh.

IZJAVLJAM

1. da sem predloženo delo pripravil samostojno;
2. da je tiskana oblika predloženega dela istovetna njegovi elektronski obliki;
3. da je besedilo predloženega dela jezikovno korektno in tehnično pripravljeno v skladu z Navodili za pripravo diplomskih nalog Višje strokovne šole, kar pomeni, da sem poskrbel, da so dela in mnenja drugih avtorjev oziroma avtoric, ki jih uporabljam oziroma navajam v besedilu, citirana oziroma povzeta v skladu z Navodili za pripravo diplomskih nalog Višje strokovne šole;
4. da se zavedam, da je plagiatorstvo – predstavljanje tujih del (v pisni ali grafični obliki) kot mojih lastnih – kaznivo po Kazenskem zakoniku Republike Slovenije;
5. da se zavedam posledic, ki bi jih na osnovi predloženega dela dokazano plagiatorstvo lahko predstavljalo za moj status na Višji strokovni šoli v skladu z relevantnim pravilnikom;
6. da sem pridobil vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v predloženem delu in jih v njem jasno označil;
7. da sem pri pripravi predloženega dela ravnal v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil soglasje etične komisije;
8. da soglašam, da se elektronska oblika predloženega dela uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;
9. da hkrati z objavo predloženega dela dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v njem in v tej izjavi.

V Ljubljani, dne _____

Podpis študenta: _____

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju pred. Antonu Kokalju, univ. dipl. inž. el., somentorju prof. dr. Luki Snoju in Julijanu Pericu, mag. jedr. teh., za vso pomoč, podporo in prizadevnost.

Posebna zahvala gre Julijanu Pericu, mag. jedr. teh., za zagotavljanje materialov in prostora, kjer sem lahko izvedel svoje raziskave. Cenim njegov čas, pripravljenost pomagati in pobudo, ki me je vodila skozi celoten proces izdelave naloge.

Prav tako se zahvaljujem mentorju pred. Antonu Kokalju, univ. dipl. inž. el., za njegovo odzivnost, pripravljenost sodelovati in čas, ki mi ga je posvetil pri mentoriranju moje naloge. Njegova strokovnost in usmerjanje sta bila ključna pri razvoju in izvedbi tega projekta.

Hvala tudi somentorju prof. dr. Luki Snoju za spodbudo in iniciativo, ki sta pripomogli k uspešni izvedbi naloge.

Hvala Metodu Zupančiču za tehnično pomoč in spodbudo. Njegova pomoč mi je omogočila, da sem svoje delo uspešno zaključil, za kar sem mu izredno hvaležen.

POVZETEK

Nevtroni imajo ključno vlogo v številnih znanstvenih in tehnoloških področjih, od jedrske fizike do medicinskih aplikacij in raziskav materialov. Razumevanje njihovega obnašanja, vključno z difuzijo v različnih medijih, je ključno za optimizacijo procesov, kot so jedrske reakcije, odkrivanje skritih materialov in analiza strukture snovi. Eden od načinov za proučevanje difuzije nevtronov je eksperiment, pri katerem se meri njihova intenziteta v odvisnosti od razdalje od vira v določenem mediju, kot je voda. Difuzijska dolžina je parameter, ki opisuje značilno razdaljo, na kateri intenziteta nevtronov eksponentno upade zaradi sipanja in absorpcije v mediju, ter določa, kako učinkovito medij moderira in absorbira nevtrone. V diplomski nalogi je bil razvit avtomatiziran eksperimentalni sistem, ki omogoča natančno proučevanje difuzije nevtronov v vodi. Sistem vključuje strojne komponente, kot so Raspberry Pi 5, Red Pitaya, detektor He-3, temperaturni senzori in grelec, ter grafični uporabniški vmesnik (GUI), ki omogoča nadzor eksperimenta, zbiranje podatkov in njihovo analizo. Poseben poudarek je bil namenjen zagotavljanju varnosti, vključno z implementacijo zaščitnih mehanizmov, kot so gumbi za nujno zaustavitev in releji za nadzor temperature. Meritve so pokazale, da je difuzijska dolžina L pri 19 °C približno $8,37\text{ cm} \pm$ negotovost, medtem ko se pri višjih temperaturah rahlo zmanjša (na območje $7,95\text{ cm}$ pri $T = 35\text{ °C}$ – do $8,01\text{ cm}$ pri $T = 25\text{ °C}$), vrednosti $-1/L$ pri višjih temperaturah pa nakazujejo minimalno temperaturno odvisnost, kar potrjuje stabilnost in natančnost eksperimenta ter skladnost s preteklimi eksperimentalnimi postavitevami (Adam, A. & Bata, L. 1961).

KLJUČNE BESEDE: difuzija nevtronov, vodni moderator, difuzijski koeficient, fizika reaktorjev, sistem za merjenje nevtronov.

SUMMARY

Neutrons play a fundamental role in a wide range of scientific and technological domains, including nuclear physics, medical applications, and materials research. A comprehensive understanding of their behavior, particularly their diffusion in different media, is essential for the optimization of processes such as nuclear reactions, the detection of concealed materials, and the structural analysis of matter. One of the established approaches for studying neutron diffusion involves measuring their intensity as a function of distance from a source within a given medium, such as water. The diffusion length is a parameter that characterizes the typical distance over which neutron intensity decreases exponentially due to scattering and absorption in the medium, thereby describing the effectiveness of the medium in moderating and absorbing neutrons.

Within the framework of this thesis, an automated experimental system was developed to facilitate precise investigations of neutron diffusion in water. The system incorporates hardware components such as a Raspberry Pi 5, Red Pitaya, a He-3 detector, temperature sensors, and a heating element, together with a graphical user interface (GUI) designed to enable experimental control, data acquisition, and subsequent analysis. Particular emphasis was placed on safety, which was ensured through the implementation of protective mechanisms including emergency stop buttons and relays for temperature regulation.

Experimental results demonstrated that the diffusion length L at 19 °C is approximately 8.37 cm \pm uncertainty. At elevated temperatures, a slight decrease was observed, with values ranging from 7.95 cm at $T = 35$ °C to 8.01 cm at $T = 25$ °C. The corresponding values of $-1/L$ at higher temperatures indicated only a minimal temperature dependence, thereby confirming both the stability and reliability of the experimental system as well as its consistency with previous experimental configurations.

KEY WORDS: neutron diffusion, water moderator, diffusion coefficient, reactor physics, experimental reactor setup.

KAZALO VSEBINE

UVOD	1
1 PREDSTAVITEV NALOGE	1
1.1 Opredelitev obravnavanega problema in teoretična izhodišča	2
1.2 Namen diplomske naloge	2
1.3 Cilji diplomske naloge	3
1.4 Predvidene dejavnosti za doseganje ciljev diplomske naloge	3
1.5 Predvidene predpostavke in omejitve pri obravnavanju problematike	4
1.6 Prispevek avtorja	5
2 TEORETIČNA OSNOVA	5
2.1 Osnovna načela difuzije nevtronov	6
2.2 Viri nevtronov in detekcija	6
2.2.1 Vrste virov nevtronov	7
2.2.2 Naravni viri	7
2.2.3 Umetni viri	7
2.2.4 Detektorji He-3: delovanje in lastnosti.....	7
2.3 Diskriminacija oblike pulza (PSD)	8
3 PREGLED LITERATURE	9
3.1 Predhodne raziskave o določanju nevtronske dolžine	9
3.2 Avtomatizacija sistemov	10
3.2.1 Avtomatizacija sistemov za detekcijo nevtronov.....	10
3.2.2 Uporaba Raspberry Pi v znanstvenih eksperimentih.....	10
3.2.3 Napredki pri zajemu in obdelavi podatkov	11
4 EKSPERIMENTALNA POSTAVITEV	11
4.1 Oblikovanje posode z vodo	11
4.1.1 Dimenzije in materiali	12
4.1.2 Postavitev nevtronskega vira	12
4.2 Vodilo detektorja in mehanizem gibanja	13
4.2.1 Specifikacije koračnega motorja.....	14
4.2.2 Konstrukcija in kalibracija vodila.....	14
4.3 Varnostne funkcije	15
4.3.1 Gumbi za nujno zaustavitev	15
4.3.2 Dodatni gumbi za nujno zaustavitev	15
4.3.3 Končna stikala in njihova integracija	16
5 STROJNA OPREMA	17
5.1 Konfiguracija Raspberry Pi 5	17
5.2 Integracija mikrokrmilnika	17

5.2.1	Pomen integracije mikrokrmilnika	18
5.2.2	Pridobivanje temperatur prek SPI.....	18
5.2.3	Preverjanje preseganja temperature.....	18
5.2.4	Prenos podatkov prek UART	18
5.3	Temperaturni senzorji	19
5.3.1	Vrste in specifikacije	19
5.3.2	Komunikacijski protokoli.....	20
5.4	Rele in upravljanje grelca	21
5.4.1	Upravljanje grelca.....	22
5.4.2	Integracija relejev v sistem.....	22
5.4.3	Varnost in zanesljivost.....	23
5.4.4	Red Pitaya FPGA za zajem signalov	23
5.4.5	Specifikacije in delovanje	24
5.4.6	Integracija v sistem.....	24
5.4.7	Operacijski sistem in namestitve	24
5.4.8	Prednosti uporabe Red Pitaya FPGA	25
6	NAČRTOVANJE IN IZVEDBA PROGRAMSKE OPREME	25
6.1	Arhitektura sistema.....	25
6.1.1	Raspberry Pi 5 kot osrednji nadzorni sistem.....	25
6.1.2	Mikrokrmilnik ESP32 za lokalno upravljanje senzorjev	26
6.1.3	Red Pitaya FPGA za zajem signalov	26
6.1.4	Varnostni in nadzorni mehanizmi	26
6.1.5	Shranjevanje in obdelava podatkov	27
6.2	Razvoj grafičnega uporabniškega vmesnika (GUI)	27
6.2.1	Pregled knjižnic tkinter in customtkinter	27
6.2.2	Postavitve in komponente GUI.....	27
	6.2.2.1 Postavitve GUI.....	28
	6.2.2.2 Komponente GUI.....	29
6.3	Algoritmi za nadzor.....	29
6.3.1	Nadzor koračnega motorja	29
6.3.2	Regulacija temperature.....	30
6.4	Zajem podatkov in beleženje	30
6.4.1	Integracija s programskim jezikom Julia	31
6.4.2	Upravljanje datotek CSV	31
6.5	Mehanizmi za varnost in obravnavanje napak.....	31
6.5.1	Povezovanje elektronskih komponent.....	31
6.5.2	Programiranje mikrokrmilnika.....	32
6.5.3	Integracija releja in grelnega sistema	32
6.5.4	Konfiguracija gonilnika koračnega motorja	32
6.5.5	Kalibracija in integracija temperaturnih senzorjev.....	32
7	ZAJEM PODATKOV IN OBDELAVA SIGNALOV.....	32

7.1	Pregled skripte Julia za detekcijo nevtronov	33
7.2	Konfiguracija Red Pitaya FPGA	33
7.2.1	Tehnike digitalne obdelave signalov	34
7.2.1.1	<i>Nizkoprepustno filtriranje</i>	<i>34</i>
7.2.1.2	<i>Korekcija izhodiščne vrednosti</i>	<i>34</i>
7.2.1.3	<i>Prilagodljivo določanje praga</i>	<i>35</i>
7.3	Uporaba PSD za diskriminacijo pulzov	35
7.3.1	Spremljanje in beleženje podatkov v realnem času	35
8	FUNKCIONALNOST GRAFIČNEGA VMESNIKA (GUI).....	36
8.1	Postavitev glavnega zaslona	36
8.1.1	Funkcije statusne vrstice	37
8.1.2	Graf zgodovine CPS	37
8.1.3	Graf temperature	38
8.1.4	Prikaz položaja vodila in nadzor	39
8.2	Načini delovanja	39
8.2.1	Samodejni način.....	39
8.2.1.1	<i>Vnos parametrov: koraki, ciljno število nevtronskih sunkov, temperatura</i>	<i>39</i>
8.2.1.2	<i>Zaporedje gibanja in meritev</i>	<i>40</i>
8.2.1.3	<i>Beleženje podatkov in generacija CSV.....</i>	<i>40</i>
8.2.2	Način 1: Čas merjenja	40
8.2.2.1	<i>Nastavitev položaja, temperature in časa</i>	<i>40</i>
8.2.2.2	<i>Postopek merjenja in prikaz rezultatov</i>	<i>41</i>
8.2.3	Način 2: Čas do 10.000 dogodkov.....	41
8.2.3.1	<i>Nastavitev položaja in temperature</i>	<i>41</i>
8.2.3.2	<i>Postopek merjenja in prikaz rezultatov</i>	<i>41</i>
9	EKSPERIMENTALNA DOLOČITEV DIFUZIJSKE DOLŽINE NEVTRONOV	41
9.1	Uvod v nevtronsko difuzijo in pomen difuzijske dolžine	41
9.2	Teoretična osnova in matematični model.....	42
9.2.1	Nevtronski tok in eksponentni upad	43
9.2.2	Povezava s hitrostjo štetja (frekvenca pulzov).....	43
9.2.3	Linearna transformacija in določanje L.....	43
9.2.4	Primerjava eksperimentalnih podatkov z referenčnimi vrednostmi	44
9.3	Grafična interpretacija razdalje in CPS	44
9.3.1	Merilna oprema	44
9.3.2	Postopek merjenja	44
9.3.3	Kalibracija razdalje.....	45
9.4	Obdelava podatkov.....	45
9.5	Rezultati in analiza.....	45
9.5.1	Grafični prikaz	45

9.5.2	Izračun statistične negotovosti:.....	46
9.5.3	Možni viri napak in odstopanj	46
9.6	Sklepne ugotovitve.....	46
10	PRIMERJAVA EKSPERIMENTALNIH REZULTATOV PRI RAZLIČNIH TEMPERATURAH.....	47
10.1	Vir nevtronov.....	47
10.2	Pregled izvedenih meritev	48
10.3	Analiza in primerjava vrednosti difuzijske dolžine	49
10.4	Test pri 20 °C	49
10.5	Test pri 25 °C	50
10.6	Test pri 35 °C	51
10.7	Test pri 45 °C	52
10.8	Primerjava rezultatov različnih temperatur	53
10.8.1	Razporeditev krivulj in nakloni	53
10.8.2	Razlike v prestrezniku (interceptu).....	54
10.8.3	Poudarki glede temperature.....	54
10.9	Trendi.....	55
10.10	Možni vzroki razlik.....	56
10.11	Primerjava z referenčnimi vrednostmi in ugotovitve	56
10.11.1	Skladnost z literaturo	57
10.12	Možna nadgradnja meritev.....	58
11	VARNOSTNI VIDIKI.....	58
11.1	Nadzor grelca in regulacija temperature	58
11.2	Mehanizmi zaustavitve v sili	58
11.3	Delovanje končnih stikal in zaščita sistema.....	59
	SKLEP	59
	SEZNAM LITERATURE IN VIROV	61

KAZALO TABEL

Tabela 1: Osnovne informacije iz vseh petih izvedenih meritev.....	49
Tabela 2: Rezultati L in 1/L	49

KAZALO SLIK

Slika 1: Detektor He-3	8
Slika 2: Shematski prikaz PSD.....	9
Slika 3: Merilna posoda za nevtronsko difuzijo v vodi	12
Slika 4: Nevtronski vir Am-Be.....	13
Slika 5: Vodilo	14

Slika 6: Shema vezja za zaustavitev v sili	16
Slika 7: Shema DAQ	24
Slika 8: Grafični prikaz programa	28
Slika 9: Grafični status okna	37
Slika 10: Grafični prikaz zgodovine CPS	38
Slika 11: Grafični prikaz temperature in zgodovine temperature	38
Slika 12: Grafični prikaz gumbov za premikanje vodila in realna dolžina	39
Slika 13: Spekter signala detektorja He-3, posnet z uporabo večkanalnega analizatorja – VKA (angl. Multi-Channel Analyzer – MCA)	42
Slika 14: Vir nevtronov Am-Be	48
Slika 15: Graf difuzije nevtronov in linearna transformacija pri 20 °C	50
Slika 16: Graf difuzije nevtronov in linearna transformacija pri 25 °C	51
Slika 17: Graf difuzije nevtronov in linearna transformacija pri 35 °C	52
Slika 18: Graf difuzije nevtronov in linearna transformacija pri 45 °C	52
Slika 19: Primerjava nevtronskih dolžin pri različnih temperaturah (povečana)	53
Slika 20: Primerjava nevtronskih difuzijskih dolžin pri različnih temperaturah	54
Slika 21: Graf L (cm)	55
Slika 22: Graf 1/L (cm ⁻¹)	56

KAZALO KRATIC IN OKRAJŠAV

Am-Be	Americij-Berilij
CPS	Števci na sekundo (Counts Per Second)
DAQ	Zajem podatkov (Data Acquisition)
FPGA	Programirljivo logično polje (Field-Programmable Gate Array)
GND	Ozemljitev (Ground)
GPIO	Splošni vhod/izhod (General Purpose Input/Output)
GUI	Grafični uporabniški vmesnik
He-3	Helij-3
I2C	Med-integrirano vezje (Inter-Integrated Circuit)
IJS	Inštitut Jožef Stefan
L	Difuzijska dolžina
MCA	Večkanalni analizator (Multi-Channel Analyzer)
PSD	Diskriminacija oblike pulza
PSU	Napajalna enota (Power Supply Unit)
SPI	Serijski periferni vmesnik (Serial Peripheral Interface)
UART	Univerzalni asinhroni sprejemnik-oddajnik (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter)

UVOD

Nevtroni so subatomske delci brez električnega naboja, ki skupaj s protoni tvorijo atomska jedra. Zaradi svoje nevtralnosti lahko prodrejo globoko v snov, kar jih dela izjemno uporabne v številnih znanstvenih in tehnoloških aplikacijah, kot so jedrska energetika (proženje cepitev v reaktorjih), medicina (radioterapija, slikanje), industrija in raziskave materialov (nevtronsko sipanje za analizo struktur). Ko nevtroni potujejo skozi snov, interagirajo z atomskimi jedri prek procesov sipanja in absorpcije. Njihovo gibanje ni premočrtno, temveč gre za naključno potovanje, opisano s teorijo difuzije. Med sipanjem nevtroni spreminjajo smer in pogosto izgubljajo energijo – ta proces imenujemo moderacija. Posebej pomembni moderatorji so lahki materiali, kot je voda, ki učinkovito upočasnjujejo hitre nevtrone do termičnih energij, kjer je verjetnost za nekatere jedrske reakcije, vključno s cepitvijo, znatno večja. Absorpcija pa pomeni, da jedro nevtron zajame, s čimer ga odstrani iz nadaljnjega procesa difuzije. Ključni parameter, ki opisuje, kako daleč povprečno nevtron prepotuje v danem mediju, preden je absorbiran ali uide iz sistema, je difuzijska dolžina (L). Ta parameter je odvisen od lastnosti medija – njegove sposobnosti sipanja, moderiranja in absorpcije nevtronov. Natančno poznavanje difuzijske dolžine, še posebej v pogosto uporabljenih materialih, kot je voda, je bistvenega pomena za načrtovanje in varno obratovanje jedrskih reaktorjev, zasnovano zaščitnih ščitov pred sevanjem ter za validacijo računskih modelov transporta nevtronov. Proučevanje nevtronske difuzije predstavlja tudi pomembno izobraževalno orodje za razumevanje osnov reaktorske fizike. Čeprav so teoretične osnove nevtronske difuzije dobro raziskane, natančne eksperimentalne meritve difuzijske dolžine, še posebej kot funkcije različnih pogojev, kot je temperatura medija, zahtevajo skrbno načrtovane postavitve in zanesljivo zajemanje podatkov. Predhodna dela na tem področju (Čižmek, 2023) so postavila temelje za eksperimentalno določanje L v vodi, vendar avtomatizacija merilnega procesa in sistematična analiza vpliva temperature ponujata možnosti za izboljšave natančnosti, ponovljivosti in učinkovitosti meritev.

Metodologija: Razvit je bil avtomatiziran eksperimentalni sistem za merjenje difuzije nevtronov v vodi pri različnih temperaturah. Sistem, ki ga krmili Raspberry Pi 5, vključuje detektor He-3, nameščen na premikajočem se vodilu, temperaturne senzorje in grelec. Za zajem in digitalno obdelavo signalov v realnem času je bil uporabljen Red Pitaya FPGA, ki omogoča diskriminacijo oblike pulza za ločevanje nevtronskih dogodkov od gama ozadja. Razvit je bil grafični uporabniški vmesnik (GUI) za nadzor eksperimenta, avtomatizirano zbiranje podatkov o intenziteti nevtronov v odvisnosti od razdalje in temperature ter njihovo analizo za določitev difuzijske dolžine.

1 PREDSTAVITEV NALOGE

Naloga se osredotoča na avtomatizacijo eksperimentalnega sistema za proučevanje difuzije nevtronov v vodi. Sistem vključuje kockasto posodo, napolnjeno z vodo, in statični

nevtronski vir v njenem središču. Za merjenje nevtronov je uporabljen detektor He-3, ki se premika po vodilu stran od vira. Namen naloge je bil zasnovati in implementirati avtomatiziran sistem, ki omogoča natančno upravljanje meritev, regulacijo temperature in zanesljivo zbiranje podatkov. Pomemben vidik naloge je bil razvoj programske opreme in integracija strojne opreme, vključno s temperaturnimi senzorji, grelcem, koračnim motorjem in varnostnimi mehanizmi. Programska rešitev, razvita na Raspberry Pi 5, vključuje grafični uporabniški vmesnik (GUI) za enostavno upravljanje sistema in analizo rezultatov. Za zagotovitev natančnega zajema in obdelave podatkov je bil v eksperimentalni sistem integriran Red Pitaya FPGA, ki je deloval kot osrednja enota za digitalno obdelavo signalov iz detektorja He-3. Naprava STEMLAB 125-14 je omogočala vzorčenje signalov s frekvenco do 100.000 vzorcev na sekundo, kar je bilo ključno za zajem kratkotrajnih pulzov nevtronskih dogodkov. S pomočjo jedra FPGA so bile izvedene napredne metode obdelave, vključno z diskriminacijo oblike pulzov (PSD), ki je omogočala učinkovito ločevanje nevtronskih dogodkov od gama ozadja in šuma. Procesirani podatki so bili nato prek Ethernet povezave posredovani na Raspberry Pi 5, kjer so bili shranjeni in analizirani v grafičnem uporabniškem vmesniku (GUI). Ta integracija je omogočila avtomatizirano in zanesljivo spremljanje eksperimentalnih meritev ter natančno analizo difuzije nevtronov v vodi.

1.1 Opredelitev obravnavanega problema in teoretična izhodišča

Diplomska naloga se osredotoča na pojav difuzije nevtronov v vodi. Za raziskovanje problema je bila uporabljena prilagojena eksperimentalna postavitve. V središču postavitve se nahaja posoda, napolnjena z vodo, ki je prilagojena za zajemanje nevtronov, z nevtronskim virom, nameščenim v sredini. Merjenje nevtronske difuzijske konstante poteka prek meritve fluksa nevtronov z detektorjem He-3, ki se premika po vodilu, kar omogoča opravljanje meritev na različnih oddaljenostih od nevtronskega vira. Za natančno izvajanje eksperimenta je vzpostavljen sistem za zaznavanje, ki omogoča štetje nevtronov in učinkovito filtracijo šuma, kar zagotavlja zanesljivost podatkov. Vzpostavljen je tudi sistem za regulacijo temperature, ki omogoča stabilne eksperimentalne pogoje. Premikanje detektorja He-3 po vodilu se nadzira s koračnim motorjem, ki je avtomatiziran s prilagojenim grafičnim uporabniškim vmesnikom (GUI), kar omogoča enostavno upravljanje in nadzor meritev. Strojna oprema vključuje celotno ožičenje sistema ter nadzor relejev in komunikacijske protokole, kot je SPI, ki se upravljajo prek operacijskega sistema Linux na platformi Raspberry Pi. Ta celovit, večplastni pristop omogoča natančne in ponovljive meritve difuzijske konstante nevtronov v vodi.

1.2 Namen diplomske naloge

Namen diplomske naloge je razvoj in implementacija avtomatiziranega sistema za proučevanje difuzije nevtronov v vodi. S sistemom, ki temelji na Raspberry Pi 5 in Red Pitaya FPGA, želimo omogočiti natančno upravljanje eksperimenta, zajemanje podatkov ter

njihovo analizo na uporabniku prijazen in varen način. Ključni cilji vključujejo avtomatizacijo eksperimentalnega postopka, integracijo strojne opreme, kot so temperaturni senzori, koračni motor, grelec in sistem za zajemanje podatkov (Red Pitaya) ter razvoj programske opreme, ki združuje nadzor nad strojno opremo, zajem podatkov in uporabniški vmesnik. Poleg tega sistem vključuje varnostne mehanizme, kot so stikala zaustavitve v sili, končna stikala in zaščita pred pregrevanjem, kar zagotavlja zanesljivo in varno delovanje. Cilj naloge je ustvariti robusten in prilagodljiv sistem, ki bo olajšal izvedbo eksperimentov, zagotovil natančne in reproducibilne meritve in prispeval k boljšemu razumevanju difuzije nevtronov v vodi.

1.3 Cilji diplomske naloge

Cilj je zasnovati sistem, ki združuje vse potrebne elemente za natančne in zanesljive meritve, vključno s pisanjem programske opreme, izvedbo elektronike, ožičenjem in integracijo detektorja, Red Pitaya in Raspberry Pi za centralno obdelavo podatkov. Osrednji del naloge je razvoj detekcijskega sistema, ki omogoča učinkovito zajemanje in diskriminacijo signalov nevtronskih dogodkov, pri čemer se uporabijo metode za ločevanje signalov od šuma. Za krmiljenje gibanja detektorja, nameščenega na vodilih, je vzpostavljen sistem s koračnimi motorji, kar omogoča avtomatizirano spreminjanje oddaljenosti od nevtronskega vira in pridobivanje podatkov na različnih razdaljah. Sistem je podprt z grafičnim uporabniškim vmesnikom (GUI) za nadzor vseh funkcij – od temperaturne regulacije vode v posodi do premikanja detektorja in nastavitve parametrov meritev. Pomemben vidik naloge je tudi uporaba platforme Raspberry Pi, ki služi kot osrednji krmilnik za komunikacijo med komponentami prek protokolov, kot sta SPI in UART, ter shranjevanje podatkov za nadaljnjo analizo. Merjenje difuzije nevtronov v vodi je tako del projekta, ki se osredotoča na prikaz fizikalnih zakonitosti, vendar je glavni poudarek na tehničnem vidiku – kako zagotoviti natančen in učinkovit zajem ter obdelavo podatkov s pomočjo najsodobnejših elektronskih naprav in tehnologij.

1.4 Predvidene dejavnosti za doseganje ciljev diplomske naloge

Razvoj in konfiguracija eksperimentalne postavitve:

- priprava posode, napolnjene z vodo, ki služi kot okolje za zajemanje nevtronov, in umestitev nevtronskega vira v njeno središče;
- vgradnja detektorja na premično vodilo, ki omogoča avtomatizirano merjenje nevtronskega signala pri različnih razdaljah od nevtronskega vira.

Oblikovanje detekcijskega sistema:

- razvoj programa za zaznavanje nevtronov in diskriminacijo signalov s filtriranjem šuma, kar omogoča natančno štetje nevtronskih dogodkov;

- povezava detektorja s platformo Red Pitaya za zajem podatkov.

Izvedba temperaturne regulacije in sistema za ogrevanje vode:

- izdelava sistema za natančno regulacijo temperature vode, ki zagotavlja stabilne pogoje v eksperimentalni posodi skozi potek meritev;
- avtomatizacija ogrevanja vode prek programske opreme in integracija temperaturnih senzorjev.

Krmiljenje koračnih motorjev za premikanje detektorja:

- programiranje koračnega motorja za natančno premikanje detektorja po vodilih, kar omogoča prilagoditev razdalje od nevtronskega vira;
- razvoj nadzornega sistema za avtomatizirano gibanje detektorja in sinhronizacijo gibanja z zbiranjem podatkov;
- razvoj grafičnega uporabniškega vmesnika (GUI);
- oblikovanje uporabniškega vmesnika, ki omogoča enostavno upravljanje vseh funkcij, vključno s temperaturno regulacijo, premikanjem detektorja, spremljanjem in shranjevanjem podatkov;
- integracija nadzora nad vsemi povezanimi napravami in prikaz realno časovnih meritev.

Integracija strojne opreme in elektronike:

- ožičenje vseh komponent, vključno z releji, senzorji in napajalnimi moduli;
- implementacija komunikacijskih protokolov, kot je SPI, za povezovanje komponent prek Raspberry Pi in usklajevanje celotnega sistema.

Obdelava in shranjevanje podatkov:

- razvoj programske opreme za shranjevanje podatkov v obliki CSV, ki beleži časovne oznake in vzorčne vrednosti za analizo;
- analiza in interpretacija meritev iz izmerjenih podatkov;
- analiza zbranih podatkov z namenom odkriti vzorce v difuziji nevtronov glede na oddaljenost od vira;
- priprava rezultatov za končne ugotovitve o obnašanju nevtronov v vodi in vplivu eksperimentalnih pogojev na izmerjene vrednosti.

1.5 Predvidene predpostavke in omejitve pri obravnavanju problematike

Eksperimentalna postavitev omogoča natančen zajem nevtronov in diskriminacijo signalov, kar zagotavlja zanesljivost meritev. Detektor He-3, ki se premika po vodilu, zaznava nevtronske dogodke na različnih dolžinah od nevtronskega vira, kar omogoča analizo

difuzije nevtronov v vodi. Stabilna temperaturna regulacija zagotavlja enakomerne eksperimentalne pogoje in zmanjšuje vpliv temperaturnih nihanj na rezultate. Programska oprema in algoritmi omogočajo učinkovito ločevanje nevtronskih signalov od šuma, kar povečuje natančnost štetja nevtronov, medtem ko komunikacija med komponentami, kot sta Red Pitaya in Raspberry Pi, poteka prek omrežja LAN, kar omogoča zanesljiv prenos podatkov. Kljub temu obstajajo določene omejitve. Natančnost meritev je odvisna od zunanjih dejavnikov, kot so elektromagnetne motnje, ki lahko vplivajo na delovanje elektronskih komponent in s tem na natančnost meritev. Učinkovitost algoritmov za diskriminacijo signalov je omejena z natančnostjo vhodnih podatkov in morebitnimi omejitvami zmogljivosti Raspberry Pi. Prav tako je pri interpretaciji rezultatov treba upoštevati omejitve v obsegu zajetih podatkov in morebitne negotovosti pri obdelavi in shranjevanju.

1.6 Prispevek avtorja

Projekt, ki poteka na Inštitutu Jožef Stefan, natančneje na odseku za reaktorsko fiziko F8, je bil zasnovan za izobraževalne in znanstvene namene, da omogoča merjenje difuzije nevtronov v vodi. Projekt izhaja iz prejšnjega dela, ki ga je opravil študent v okviru svoje magistrske naloge (Čižmek, 2023), pri čemer je bil moj prispevek pomemben za nadgradnjo in avtomatizacijo sistema. Naloga je avtomatizirati celoten sistem, vzpostaviti grafični uporabniški vmesnik in povezati vse komponente v funkcionalno celoto. Skozi ta proces sem pridobil dragocene izkušnje pri integraciji elektronskih komponent, uporabi Red Pitaya (b.l.) in Raspberry Pi, ter pri implementaciji komunikacijskih protokolov, kot je SPI. Projekt je tako nadgradnja predhodnega dela in predstavlja pomemben prispevek k izobraževalnim in raziskovalnim dejavnostim Inštituta Jožef Stefan. Proces avtomatizacije in integracije celotnega sistema je bil izziv, potrebno je bilo delo z novimi sistemi, kot je Red Pitaya, ter delo v radioaktivno zaščitenem območju, vendar je prinesel tudi osebno zadovoljstvo in poglobljeno razumevanje področja eksperimentalne fizike in elektronike.

2 TEORETIČNA OSNOVA

To poglavje postavlja teoretične temelje diplomske naloge. Podrobno opisuje osnovna načela difuzije nevtronov v snovi, vključno z difuzijsko enačbo in pomenom ključnih parametrov. Predstavlja tudi vrste nevtronskih virov ter se osredotoča na delovanje in lastnosti detektorja He-3, ki je bil uporabljen v eksperimentu. Nazadnje pojasnjuje tehniko diskriminacije oblike pulza (PSD), ki je ključna za ločevanje nevtronskih signalov od neželenega ozadja, kot so gama žarki in šum. Ta teoretični okvir je bistven za razumevanje eksperimentalne postavitve, obdelave podatkov in interpretacije rezultatov.

2.1 Osnovna načela difuzije nevtronov

Difuzija nevtronov je fizikalni proces, pri katerem se nevtroni gibljejo skozi snov in posledično naključnih trčijo v atomska jedra. Gre za stohastičen proces, ki je odvisen od interakcij med nevtroni in snovjo, v kateri se gibljejo. Nevtroni, ki jih oddaja vir, imajo sprva visoko energijo (t. i. hitri nevtroni), med trki pa izgubljajo energijo in sčasoma dosežejo termično energijsko območje ($\sim 0,025$ eV). Termični nevtroni so nevtroni, ki so dosegli termično ravnovesje z okoliško snovjo. To pomeni, da je njihova povprečna kinetična energija primerljiva s termično energijo atomov ali molekul materiala, v katerem se nahajajo. Termični nevtroni imajo nižjo energijo in se zato počasneje širijo skozi snov. Njihova najverjetnejša hitrost pri tej temperaturi je približno 2200 m/s. Zaradi svoje nizke energije imajo termični nevtroni veliko večjo verjetnost (učinkoviti presek) za povzročitev nekaterih jedrskih reakcij, zlasti cepitve jeder, kot sta uran-235 ali plutonij-239. Zato so ključnega pomena za delovanje večine jedrskih reaktorjev (Stacey, W. M., 2018), kjer jih pridobivajo z upočasnjevanjem (moderacijo) hitrih nevtronov, ki nastanejo pri cepitvi. Difuzija nevtronov je opisana z difuzijsko enačbo, ki temelji na zakonih ohranitve mase in toka delcev (Nuclear Power, b.l.). Enačba upošteva tri ključne parametre: koeficient difuzije, dolžino proste poti nevtronov in verjetnost absorpcije.

Koeficient difuzije določa, kako hitro se nevtroni širijo skozi snov, in je odvisen od lastnosti materiala, kot sta gostota in sestava atomskih jeder. Dolžina proste poti določa povprečno razdaljo, ki jo nevtron prepotuje med dvema zaporednima trkoma. Absorpcija pa predstavlja verjetnost, da bo nevtron zajet v jedru, kar pomeni, da preneha prispevati k procesu difuzije.

$$\partial u / \partial t = D \nabla^2 u \dots\dots\dots(2.1)$$

Pomemben koncept pri difuziji nevtronov je tudi nevtronski tok, ki opisuje število nevtronov, ki preidejo skozi določeno površino na enoto časa. Tok nevtronov se zmanjšuje z razdaljo od vira zaradi absorpcije in širjenja. V eksperimentalnem okolju, kot je posoda z vodo, ima voda dvojno vlogo: upočasnjuje nevtrone (moderira) in jih delno absorbira. Razumevanje difuzije nevtronov je ključnega pomena za različne aplikacije, kot so delovanje jedrskih reaktorjev, detekcija nevtronov in raziskave materialov.

2.2 Viri nevtronov in detekcija

Viri nevtronov se delijo na naravne in umetne. Za detekcijo nevtronov se uporabljajo specializirani detektorji (Massachusetts Institute of Technology, 2025), kot je detektor He-3, ki je občutljiv na termične nevtrone.

2.2.1 Vrste virov nevtronov

Nevtronski viri se razvrščajo glede na njihov izvor in mehanizem generiranja nevtronov. Ločimo jih na naravne in umetne vire, pri čemer ima vsak svoje značilnosti in področja uporabe.

2.2.2 Naravni viri

Naravni nevtroni izvirajo iz:

- kozmičnih žarkov, ki v zgornji atmosferi ustvarjajo nevtrone ob trkih visoko energijskih delcev z jedri atomov;
- radioaktivnih razpadov, kjer izotopi, kot sta radij-226 in torij-232, proizvajajo nevtrone kot del sekundarnih reakcij;
- naravni viri so manj nadzorovani in njihova nevtronska intenziteta je relativno nizka, zato so redko uporabljeni v laboratorijskih eksperimentih.

2.2.3 Umetni viri

Umetni viri nevtronov so zasnovani za specifične potrebe in se nahajajo v:

- jedrskih reaktorjih, ki proizvajajo nevtrone med fisijskimi reakcijami; to so zelo intenzivni in stabilni viri, primerni za raziskave materialov in nevtronsko radiografijo;
- nevtronski generatorji, ki uporabljajo reakcije, kot sta fuzija deuterija in tritija (D-T reakcija), za proizvodnjo nevtronov; ti so kompaktni in prilagodljivi za različne aplikacije;
- radioizotopski viri, kot je kalifornij-252, ki oddajajo nevtrone med spontano fisijo; ti so mobilni in enostavni za uporabo, vendar imajo omejeno življenjsko dobo in intenzivnost.

2.2.4 Detektorji He-3: delovanje in lastnosti

Detektorji He-3 so specializirane naprave za detekcijo nevtronov, ki delujejo na principu jedrskih reakcij med termičnimi nevtroni in izotopom He-3. Zaradi svoje visoke občutljivosti, zanesljivosti in sposobnosti natančne ločitve nevtronskih dogodkov so pogosto uporabljeni v raziskavah, kjer sta ključna štetje nevtronov in analiza njihovega obnašanja (slika 1).

Slika 1: Detektor He-3



Vir: Global Nucleonics 2025

Delovanje

Detektorji He-3 temeljijo na reakciji:



kjer nevtron (n) reagira z jedrom He-3 in ustvari proton (H) in tritij (T), pri čemer se sprosti energija 764 keV. Ta reakcija sproži ionizacijo plina znotraj detektorja, kar povzroči merljiv električni signal. Detektorji običajno vključujejo napetostne elektrode, ki ustvarijo električno polje za zbiranje prostih elektronov in ionov, nastalih med ionizacijo. Za vzpostavitev tega polja in zagotovitev ustreznega signala je na elektrode priključena visoka delovna napetost, ki znaša približno 900 voltov.

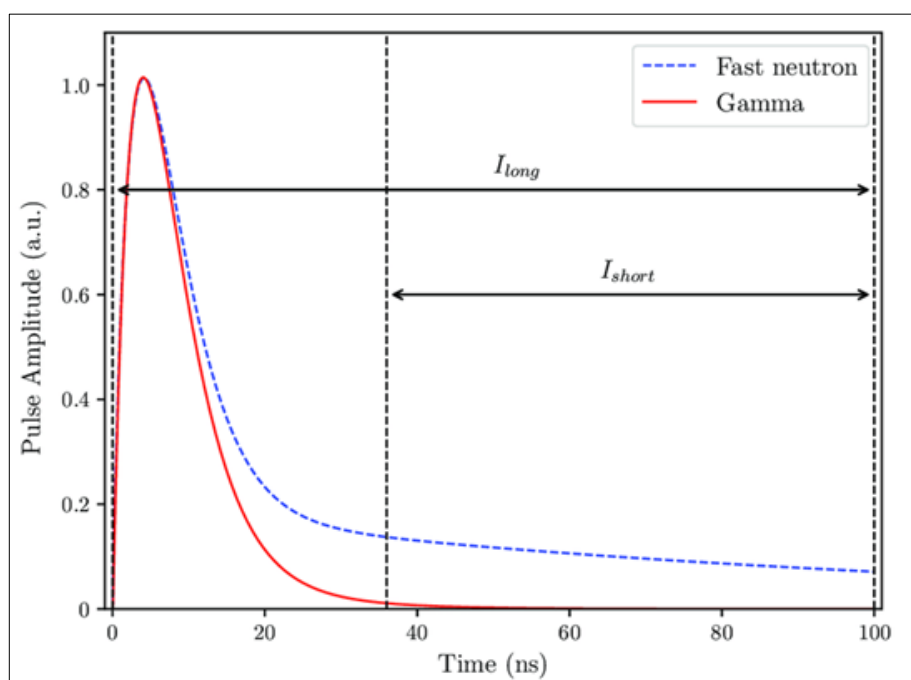
2.3 Diskriminacija oblike pulza (PSD)

Diskriminacija oblike pulza (angl. Pulse Shape Discrimination – PSD) je tehnika za ločevanje različnih vrst delcev ali dogodkov na podlagi analize njihovega električnega signala (slika 2). Uporablja se predvsem pri detekciji nevtronov, kjer je treba razlikovati med nevtroni in drugimi signali, kot so gama žarki ali šum. PSD temelji na primerjavi časovnih ali amplitudnih značilnosti pulza, kar omogoča natančno identifikacijo delcev in zmanjšanje šuma v meritvah. Vsaka interakcija nevtrona ali gama fotona z detektorjem povzroči značilen električni signal, imenovan pulz. Oblika pulza je odvisna od vrste delca, njegove energije in interakcije s snovjo detektorja. V kontekstu detekcije nevtronov in gama žarkov je ključna razlika v razmerju med:

- hitro komponento: energija, sproščena v začetnem delu pulza;
- skupno energijo: celotna energija pulza, izmerjena v daljšem časovnem obdobju;
- nevtroni in gama žarki imajo različna PSD-razmerje, kar omogoča njihovo ločitev;

- uporaba PSD;
- filtriranje signalov: PSD se uporablja za razlikovanje med nevtroni in gama žarki, s čimer se izboljša natančnost detekcije nevtronov;
- odstranjevanje šuma: PSD pomaga odstraniti neželene signale, ki izvirajo iz šuma ali drugih vrst sevanja;
- identifikacija dogodkov: tehnika omogoča klasifikacijo dogodkov, kar je ključno pri meritvah, kjer je potrebna visoka natančnost.

Slika 2: Shematski prikaz PSD



Vir: *Critical Review of Scintillating Crystals for Neutron Detection*, Kelum A.A. Gamage, Michal Cieslak, ResearchGate (2019)

3 PREGLED LITERATURE

To poglavje obravnava relevantno literaturo in predhodne raziskave, ki služijo kot osnova za diplomsko nalogo. Osredotoča se na prejšnja dela o določanju nevtronske difuzijske dolžine, pri čemer izpostavlja delo, na katerem ta naloga neposredno gradi. Poleg tega pregleduje napredek na področju avtomatizacije merilnih sistemov v jedrski fiziki, vključno z uporabo platform, kot je Raspberry Pi, ter obravnava sodobne tehnike zajema in obdelave podatkov, ki so ključne za natančne in učinkovite eksperimente, kot je predstavljen v tej nalogi.

3.1 Predhodne raziskave o določanju nevtronske dolžine

Osnova za to diplomsko nalogo je delo, ki ga je v svoji raziskavi opravil Čížmek (2023). Njegova naloga predstavlja korak v razumevanju nevtronske difuzije v vodi, saj je v svojem

eksperimentalnem pristopu raziskoval dolžino nevtronskega prodiranja in razpadanja v vodnem mediju. Njegova študija vključuje razvoj eksperimentalne postavitve, ki je omogočala meritve nevtronskih lastnosti in njihovih interakcij z vodo. Določanje difuzijske dolžine nevtronov v moderatorskih materialih, še posebej v vodi, je klasičen problem in eksperiment na področju reaktorske fizike. Že desetletja se izvajajo meritve za validacijo teoretičnih modelov in zagotavljanje referenčnih podatkov za načrtovanje jedrskih sistemov in zaščite pred sevanjem. Standardne vrednosti za difuzijsko dolžino v vodi pri sobni temperaturi so dobro dokumentirane v številnih učbenikih in priročnikih, kot sta na primer. Že zgodnejše raziskave, kot na primer delo Adama in Bate (1961), so se osredotočale na merjenje temperaturne odvisnosti te količine, kar poudarja pomen tega parametra v jedrski tehniki. Te meritve, ki pogosto uporabljajo bodisi pulzne nevtronske vire bodisi stacionarne vire z mapiranjem fluksa kot v tem delu in delu Čižmeka (2023), so ključne za razumevanje transporta nevtronov in služijo kot pomembno orodje pri izobraževanju jedrskih inženirjev in fizikov. Primerjava rezultatov te naloge s temi uveljavljenimi vrednostmi omogoča oceno natančnosti in zanesljivosti razvitega avtomatiziranega sistema (Duderstadt in Hamilton 1976; Lamarsh, J. R. & Baratta, A. J. 2001).

3.2 Avtomatizacija sistemov

Razvoj tehnologij za avtomatizacijo sistemov za detekcijo nevtronov, uporaba zmogljivih mikroprocesorskih platform, kot je Raspberry Pi, ter napredki pri zajemu in obdelavi podatkov so ključni dejavniki, ki so v zadnjih letih močno izboljšali raziskovalne procese na področju jedrske fizike. Ti napredki omogočajo natančnejše meritve, večjo ponovljivost eksperimentov ter boljšo obdelavo in analizo podatkov.

3.2.1 Avtomatizacija sistemov za detekcijo nevtronov

Avtomatizacija procesov pri detekciji nevtronov je prinesla možnost izvajanja zapletenih eksperimentov z minimalnim posredovanjem človeka. Sistemi, ki vključujejo avtomatsko premikanje detektorjev, temperaturno regulacijo in varnostne funkcije, so omogočili večjo natančnost in hitrost pri izvedbi eksperimentov. Avtomatizirani procesi odpravljajo napake zaradi človeških vplivov in zagotavljajo zanesljivost meritev, kar je ključno pri raziskavah, kjer je potrebna visoka stopnja preciznosti.

3.2.2 Uporaba Raspberry Pi v znanstvenih eksperimentih

Raspberry Pi je postal priljubljena izbira za avtomatizacijo in nadzor v znanstvenih eksperimentih zaradi svoje vsestranskosti, nizke cene in zmogljivosti. Platforma omogoča povezovanje različnih komponent, kot so detektorji, temperaturni senzorji in motorji, ter njihovo nadzorovanje prek enostavnega programiranja. Poleg tega Raspberry Pi omogoča

zbiranje, obdelavo in shranjevanje podatkov v realnem času, kar je ključnega pomena za eksperimente, kjer je potrebno natančno spremljanje in analiziranje dinamičnih procesov.

3.2.3 Napredki pri zajemu in obdelavi podatkov

Z razvojem naprednih metod zajema in obdelave podatkov je mogoče učinkoviteje analizirati signale, pridobljene med eksperimenti z nevtroni. Uporaba naprav FPGA, kot je Red Pitaya, omogoča zajem visoko frekvenčnih signalov in njihovo sprotno obdelavo. Metode, kot so digitalno filtriranje, diskriminacija oblike pulzov (PSD) in analiza v realnem času, so bistvene za izboljšanje natančnosti detekcije in zmanjšanje šuma. Poleg tega programske rešitve, kot so skripte v jeziku Julia ali Python, omogočajo hitro obdelavo velikih količin podatkov in njihovo shranjevanje v strukturirani obliki za nadaljnjo analizo. Kombinacija teh treh področij – avtomatizacije, uporabe Raspberry Pi in naprednih metod za zajem in obdelavo podatkov – predstavlja temelj za sodobne eksperimente v jedrski fiziki. Ti napredki omogočajo boljše razumevanje kompleksnih pojavov, kot je difuzija nevtronov, in prispevajo k učinkovitejši izvedbi eksperimentov in analizi rezultatov.

4 EKSPERIMENTALNA POSTAVITEV

To poglavje podrobno opisuje fizično zasnovo in komponente eksperimentalnega sistema, uporabljenega za meritve nevtronske difuzije. Predstavljeno je oblikovanje posode z vodo (slika 3), vključno z njenimi dimenzijami, materialom in centralno postavitvijo nevtronskega vira. Opisan je tudi mehanizem za premikanje detektorja, ki vključuje linearno vodilo, koračni motor in postopek kalibracije za natančno pozicioniranje. Ključni del poglavja je namenjen tudi varnostnim funkcijam sistema, kot so gumbi za nujno zaustavitev in končna stikala, ki zagotavljajo varno delovanje postavitve.

4.1 Oblikovanje posode z vodo

Posoda je bila prilagojena tako, da omogoča izvedbo eksperimenta. Zgornji del posode je bil odrezan, kar omogoča enostaven dostop do notranjosti, vstavljanje nevtronskega vira in pravilno umestitev detektorja. Posoda je izdelana iz visokokakovostnega polietilena, ki zagotavlja zadostno mehansko trdnost in odpornost na deformacije, hkrati pa ne vpliva na tok nevtronov.

Slika 3: Merilna posoda za nevtronsko difuzijo v vodi



Vir: Inštitut Jožefa Stefan F8, december 2024.

4.1.1 Dimenzije in materiali

Dimenzije posode znašajo približno 120 cm v višino ter 100 cm v širino in globino, kar zagotavlja dovolj prostora za izvajanje eksperimenta. Kot material je bil uporabljen polietilen, ki zaradi nizke absorpcije nevtronov zagotavlja, da meritve odražajo predvsem difuzijo v vodi in ne interakcij s stenami posode.

4.1.2 Postavitev nevtronskega vira

Nevtronski vir Am-Be je nameščen v središče kockaste posode, napolnjene z vodo, kar omogoča simetrično širjenje nevtronov v vse smeri. Voda služi kot moderacijski medij, ki upočasnjuje hitre nevtrone na termične energije in delno absorbira nevtrone. Vir je zaščiten z ohišjem za varnost operaterja in okolja. Centralna postavitev zagotavlja enakomerno širjenje nevtronov ter omogoča natančno analizo njihove difuzije in dolžine prodiranja (slika 4).

Slika 4: Nevtronski vir Am-Be

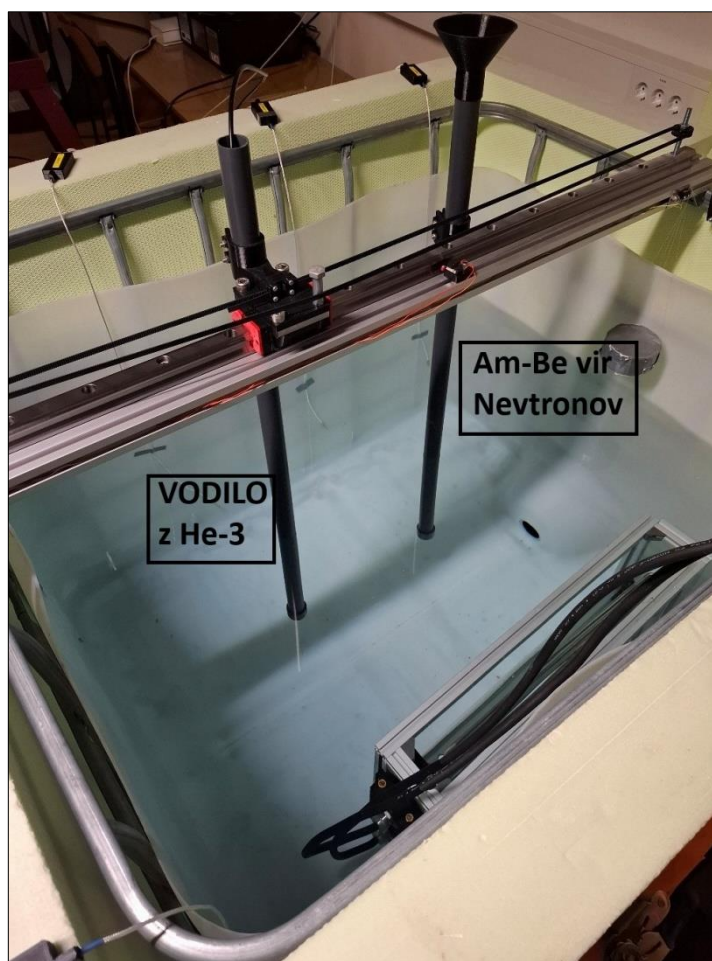


Vir: Inštitut Jožefa Stefan F8, december 2024.

4.2 Vodilo detektorja in mehanizem gibanja

Vodilo detektorja je zasnovano za natančno premikanje detektorja He-3 vzdolž linearne poti, kar omogoča meritve nevtronskega toka na različnih oddaljenostih od nevtronskega vira. Detektor je pritrjen na premični del vodila, ki se gladko in stabilno premika po tirnici, kar zagotavlja ponovljive in zanesljive meritve (slika 5).

Slika 5: Vodilo



Vir: Inštitut Jožefa Stefan F8, december 2024.

4.2.1 Specifikacije koračnega motorja

Za nadzor gibanja detektorja je uporabljen koračni motor z visokim navorom, ki omogoča natančno premikanje in pozicioniranje. Ključne specifikacije vključujejo:

- Ločljivost: Motor zagotavlja korake z mikrokoračnim načinom za visoko natančnost premikov. Ločljivost ima $1,8^\circ$ na 360° kar je 200 korakov na obrat.
- Navor: Dovolj močan navor omogoča premikanje detektorja brez zdrsov. Navor motorja je 0,44 Nm.
- Vmesnik: Motor je povezan z gonilnikom, ki ga nadzoruje Raspberry Pi, kar omogoča popolno integracijo v avtomatizirani sistem.

4.2.2 Konstrukcija in kalibracija vodila

Konstrukcija vodila je prilagojena potrebam eksperimenta ter zagotavlja togost in stabilnost. Linearna tirnica je izdelana iz materialov, odpornih proti obrabi, kar omogoča dolgotrajno

uporabo brez deformacij. Detektor je trdno pritrjen na premični del, s čimer se zagotavlja pravilna orientacija med gibanjem.

Kalibracija vodila vključuje natančno določitev začetne in končne točke premika ter preverjanje linearne natančnosti gibanja. Postopek kalibracije vključuje:

- Preverjanje korakov: Število korakov motorja je usklajeno z dejansko premaknjeno razdaljo.
- Merjenje točnosti: Z merilnimi instrumenti se preveri natančnost položaja detektorja na več točkah vzdolž vodila.
- Umerjanje: Sistem je prilagojen tako, da morebitna odstopanja ne vplivajo na meritve.

4.3 Varnostne funkcije

Varnostne funkcije so ključnega pomena za zaščito opreme in operaterja pri delovanju eksperimentalnega sistema za proučevanje difuzije nevtronov v vodi. Sistem vključuje več mehanizmov, ki zagotavljajo varno delovanje in preprečujejo morebitne poškodbe komponent.

4.3.1 Gumbi za nujno zaustavitev

Gumbi za nujno zaustavitev so nameščeni na fizični opremi in v programu ter omogočajo takojšnjo prekinitev delovanja v primeru izrednih razmer. Ob pritisku na gumb se vse mehanske in električne aktivnosti, kot je gibanje vodila ali delovanje grelca, nemudoma ustavijo.

Ključne značilnosti gumbov za nujno zaustavitev:

- Enostavna dostopnost: Gumbi so strateško nameščeni, da jih lahko operater hitro aktivira.
- Povezava s sistemom: Ob aktivaciji gumba sistem pošlje signal za zaustavitev vsem komponentam, kar prepreči nadaljnje delovanje.

4.3.2 Dodatni gumbi za nujno zaustavitev

Poleg standardnih gumbov za nujno zaustavitev, ki omogočajo takojšnjo prekinitev delovanja v primeru izrednih razmer, je sistem opremljen tudi z dodatnimi varnostnimi mehanizmi za zaznavanje presežka gladine vode in temperature.

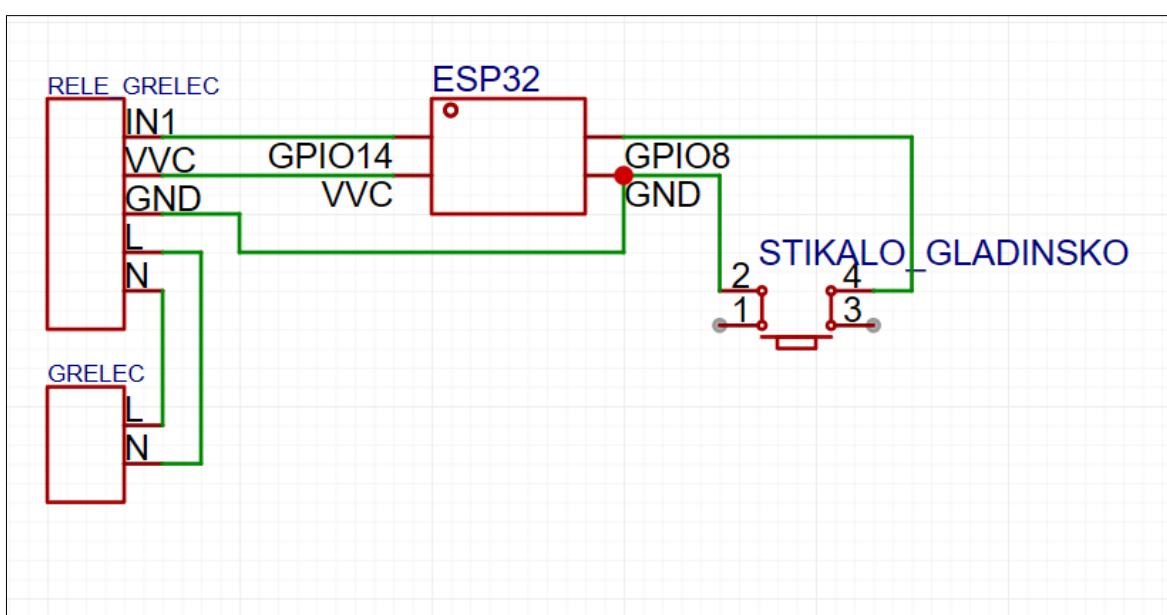
- Gladinski senzorji: V primeru, da gladina vode preseže določeno varno mejo, sistem avtomatsko aktivira varnostni ukrep in zaustavi delovanje. Ta funkcija preprečuje

prelivanje vode, ki bi lahko poškodovalo elektronske komponente ali ustvarilo nevarne pogoje za delovanje.

- Samodejni izklop grelca: Sistem spremlja temperaturo vode prek temperaturnih senzorjev. Če temperatura preseže varno mejo, grelec nemudoma preneha delovati, ne glede na trenutno stanje programa. To zagotavlja zaščito pred pregrevanjem, ki bi lahko povzročilo poškodbe sistema ali varnostno tveganje.

Te funkcije delujejo neodvisno od glavnega programa, kar pomeni, da se zaustavitev izvede tudi v primeru napake v programski opremi ali nepredvidenih okoliščin. Na sliki 6 je prikazana shema vezja za zaustavitev v sili.

Slika 6: Shema vezja za zaustavitev v sili



Vir: Institut Jožefa Stefa F8, december 2024.

4.3.3 Končna stikala in njihova integracija

Končna stikala so nameščena na obeh koncih vodila detektorja in preprečujejo, da bi se detektor premaknil izven dovoljenega območja gibanja. Ta stikala služijo kot fizične meje, ki ščitijo mehanske komponente pred preobremenitvijo.

Ključne lastnosti končnih stikal:

- Natančna integracija: Stikala so povezana z nadzornim sistemom, ki takoj zaustavi gibanje koračnega motorja ob aktivaciji stikala.
- Fizična zaščita: Poleg elektronske zaustavitve stikala delujejo kot mehanska blokada, ki preprečuje poškodbe.

- Diagnostika: Sistem ob aktivaciji stikala prikaže opozorilo, kar omogoča operaterju, da preveri in odpravi vzrok težave.

5 STROJNA OPREMA

Strojna oprema predstavlja temelj eksperimentalnega sistema za proučevanje difuzije nevtronov v vodi. Natančna izbira in konfiguracija komponent sta ključnega pomena za zagotavljanje natančnih meritev, zanesljivega delovanja in varnosti celotnega sistema. V tem poglavju bodo podrobneje predstavljene glavne strojne komponente, uporabljene v eksperimentu, vključno z Raspberry Pi 5, mikrokrmilnikom, temperaturnimi senzorji, releji, grelcem in Red Pitaya FPGA za zajem signalov.

5.1 Konfiguracija Raspberry Pi 5

Raspberry Pi 5 je osrednji računalniški sistem v naši eksperimentalni postavitvi, ki služi kot glavni nadzorni center za upravljanje vseh strojnih komponent in zbiranje podatkov. Ta majhen, a zmogljiv računalnik je izbran zaradi svoje vsestranskosti, nizke cene in velike skupnosti uporabnikov, kar olajša razvoj in integracijo potrebne programske opreme. Raspberry Pi 5 je opremljen z zmogljivim procesorjem ARM, ki omogoča hitro obdelavo podatkov in izvajanje kompleksnih algoritmov v realnem času. Pomnilnik (RAM) je zadosten za shranjevanje in obdelavo velikih količin podatkov, ki jih pridobivamo med eksperimentom. Operacijski sistem, Linux distribucija Raspbian, je prilagojen za naše potrebe, omogočajoč enostavno namestitev in uporabo potrebnih knjižnic in orodij za nadzor strojne opreme. Za povezavo z drugimi komponentami eksperimentalnega sistema uporabljamo GPIO (General Purpose Input/Output) piksle Raspberry Pi 5. Ti omogočajo neposredno komunikacijo z mikrokrmilniki, senzorji in drugimi napravami prek različnih komunikacijskih protokolov, kot so I2C, SPI in UART. Poleg tega je Raspberry Pi opremljen z več USB-priključki, ki omogočajo povezavo dodatnih perifernih naprav, kot so tipkovnice, miške in zunanji trdi diski za shranjevanje podatkov. V našem sistemu Raspberry Pi 5 nadzira delovanje koračnega motorja za premikanje detektorja, upravlja temperaturne senzorje in grelec za regulacijo temperature vode ter zbira podatke iz FPGA Red Pitaya. Programska oprema, razvita v Pythonu, omogoča avtomatizacijo eksperimenta, obdelavo podatkov v realnem času in vizualizacijo rezultatov prek grafičnega uporabniškega vmesnika (GUI).

5.2 Integracija mikrokrmilnika

Za upravljanje strojnih komponent eksperimentalnega sistema za proučevanje difuzije nevtronov v vodi uporabljamo mikrokrmilnik ESP32. ESP32 je izbran zaradi svoje visoke zmogljivosti, vgrajenih komunikacijskih protokolov in možnosti enostavne integracije z drugimi komponentami sistema. Mikrokrmilnik ESP32 igra ključno vlogo pri zbiranju in

obdelavi podatkov iz temperaturnih senzorjev ter nadzoru varnostnih funkcij, kot je upravljanje relejev za grelec.

5.2.1 Pomen integracije mikrokrmilnika

Integracija mikrokrmilnika ESP32 v eksperimentalni sistem omogoča učinkovito in zanesljivo upravljanje temperaturnih podatkov in varnostnih funkcij. Z uporabo protokola SPI za pridobivanje podatkov iz senzorjev PT100 in protokola UART za prenos povprečnih temperatur do Raspberry Pi 5 sistem zagotavlja natančno spremljanje in regulacijo temperature. Poleg tega varnostni mehanizem za preverjanje preseganja temperature zagotavlja, da grelec deluje samo pod nadzorom, kar povečuje varnost in zanesljivost celotnega eksperimenta.

5.2.2 Pridobivanje temperatur prek SPI

V našem sistemu uporabljamo pet PT100 temperaturnih senzorjev, ki zagotavljajo visoko natančnost in zanesljivost meritev temperature. Signali iz teh senzorjev pretvarjajo v digitalno obliko prek modulov Adafruit MAX31865, ki omogočajo komunikacijo prek protokola SPI (angl. Serial Peripheral Interface). Protokol SPI je izbran zaradi svoje visoke hitrosti in zanesljivosti pri prenosu podatkov, kar omogoča hitro in natančno pridobivanje temperaturnih podatkov iz vseh petih senzorjev hkrati. Mikrokrmilnik ESP32 prek povezave SPI pridobi podatke iz vseh petih senzorjev PT100. Te podatke nato obdelava tako, da izračuna povprečno temperaturo, kar omogoča stabilno in natančno spremljanje temperaturnih pogojev v eksperimentalni postavitvi. Izračun povprečne temperature je bistvenega pomena za regulacijo sistema, saj zagotavlja enotno temperaturno vrednost, na podlagi katere se sprejemajo nadzorni ukrepi.

5.2.3 Preverjanje preseganja temperature

Poleg izračuna povprečne temperature sistem preverja, ali trenutna temperatura presega varno mejo 85 °C. Če temperatura preseže to mejo, ESP32 avtomatsko ugasne rele za grelec, kar prepreči pregrevanje vode in s tem morebitne poškodbe sistema ali nevarnosti za operaterje. Ta varnostni mehanizem deluje neodvisno od glavnega programa na Raspberry Pi 5, kar zagotavlja dodatno raven varnosti in zanesljivosti sistema.

5.2.4 Prenos podatkov prek UART

Povprečni podatki o temperaturi, izračunani na ESP32, se nato prenesejo prek protokola UART (angl. Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) do glavnega računalnika Raspberry Pi 5. Protokol UART omogoča zanesljiv in učinkovit prenos podatkov med

mikrokrmilnikom in Raspberry Pi, kar omogoča hitro obdelavo in vizualizacijo temperaturnih podatkov v realnem času.

5.3 Temperaturni senzori

Temperaturni senzori so ključni za vzdrževanje konstantne temperature vode v eksperimentalni postavitvi, kar je bistveno za natančne meritve difuzije nevtronov. V našem sistemu uporabljamo pet visokokakovostnih temperaturnih senzorjev PT100, ki zagotavljajo natančno in zanesljivo merjenje temperature v realnem času. Senzorji so strateško nameščeni na različnih mestih v posodi, da zagotavljajo celovito spremljanje temperaturnih pogojev med izvajanjem eksperimenta. Z dodatno uporabo črpalke zagotavljamo homogenost temperature, celotne posode.

5.3.1 Vrste in specifikacije

Za merjenje temperature v eksperimentalnem sistemu uporabljamo pet senzorjev PT100, ki so znani po svoji visoki natančnosti in stabilnosti. Senzorji PT100 so termoelektrični senzori, katerih upor se spreminja s temperaturo, kar omogoča zelo natančno merjenje.

Specifikacije senzorjev PT100:

- Tip: PT100 (Platin 100)
- Delovni obseg: -200 do $+850$ °C, kar pokriva vse relevantne temperature v našem eksperimentu.
- Natančnost: $\pm 0,1$ °C, kar zagotavlja visoko natančnost pri regulaciji temperature.
- Stabilnost: Dolgotrajna stabilnost in odpornost na mehanske in kemijske vplive, kar omogoča zanesljivo delovanje skozi daljše obdobje.
- Lineariteta: Visoka lineariteta meritev omogoča enostavno kalibracijo in interpretacijo podatkov.

Za pretvorbo signala iz senzorjev PT100 v protokol SPI (angl. Serial Peripheral Interface) uporabljamo modul Adafruit MAX31865, ki omogoča hitro in učinkovito komunikacijo med senzori in glavnim nadzornim sistemom. Ta modul zagotavlja visoko ločljivost in natančnost meritev, kar je ključno za natančno regulacijo temperature v eksperimentu.

Specifikacije modula Adafruit MAX31865:

- Komunikacijski protokol: SPI, kar omogoča hitro in zanesljivo prenašanje podatkov med senzorji in mikrokrmilnikom.
- Ločljivost: Visoka ločljivost pretvorbe omogoča natančno merjenje temperaturnih sprememb.
- Kompatibilnost: Modul je združljiv z Raspberry Pi 5 in ESP32, kar omogoča enostavno integracijo v naš sistem.
- Napajanje: Modul deluje na standardnem 3,3 ali 5 V napetju, kar omogoča prilagodljivost glede na potrebe sistema.
- Vgrajene zaščitne funkcije: Modul vključuje zaščito pred prekomernim tokom in napetostjo, kar povečuje zanesljivost in varnost sistema.

Integracija senzorjev v sistem: Pet senzorjev PT100 je nameščenih na različnih točkah v posodi za zagotavljanje celovitega spremljanja temperature. Vsak senzor je povezan z modulom Adafruit MAX31865, ki pretvori analogni signal senzorja PT100 v digitalni signal prek protokola SPI. Ti digitalni signali nato potujejo do mikrokrmilnika ESP32, ki jih obdela in pošlje na Raspberry Pi 5 za nadaljnjo obdelavo in vizualizacijo.

Prednosti uporabe senzorjev PT100 in modula Adafruit:

- Visoka natančnost: Senzorji PT100 skupaj z modulom Adafruit zagotavljajo zelo natančne meritve temperature, kar je ključnega pomena za stabilno difuzijo nevtronov.
- Zanesljivost: Kombinacija robustnih senzorjev PT100 in zanesljivega pretvorbenega modula omogoča dolgotrajno in brezhibno delovanje sistema.
- Enostavna integracija: Uporaba standardiziranih komunikacijskih protokolov in kompatibilnih modulov olajša integracijo senzorjev v obstoječi nadzorni sistem.
- Vodoodpornost

5.3.2 Komunikacijski protokoli

Za učinkovito delovanje eksperimentalnega sistema je ključno, da so temperaturni senzorji pravilno integrirani z ostalimi komponentami prek ustreznih komunikacijskih protokolov. V našem sistemu uporabljamo protokol SPI (angl. Serial Peripheral Interface), ki omogoča hitro in zanesljivo prenašanje podatkov med senzorji in glavnim nadzornim sistemom.

Protokol SPI:

- Hitrost: SPI omogoča visoko hitrost prenosa podatkov, kar je nujno za realno časovno spremljanje temperaturnih sprememb.
- Zanesljivost: Visoka stopnja zanesljivosti pri prenosu podatkov zmanjšuje možnost napak in zagotavlja natančne meritve.

- Enostavnost: SPI je enostaven za implementacijo in konfiguracijo, kar olajša razvoj in vzdrževanje sistema.
- Paralelna komunikacija: Omogoča povezavo več senzorjev prek istega vodila, kar zmanjšuje kompleksnost sistema in število potrebnih povezav.

Implementacija v sistemu: Vsak od petih senzorjev PT100 je povezan z lastnim modulom Adafruit, ki pretvori analogni signal senzorja v digitalni signal prek protokola SPI. Ti digitalni signali so nato poslani na mikrokontroler ESP32, ki jih obdela in pošlje na Raspberry Pi 5 za nadaljnjo obdelavo.

Prednosti uporabe protokola SPI:

- Visoka hitrost: Omogoča hitro zbiranje in obdelavo podatkov, kar je bistveno za stabilno regulacijo temperature in natančno analizo difuzije nevtronov.
- Možnost razširitve: Protokol SPI omogoča enostavno dodajanje dodatnih senzorjev ali drugih komponent brez potrebe po spremembi osnovne arhitekture sistema.
- Minimalna latenca: Zmanjšuje časovni zamik med zaznavanjem temperaturnih sprememb in njihovim odzivanjem v sistemu, kar izboljšuje natančnost in odzivnost sistema.

Integracija z ostalimi komponentami: Protokol SPI je integriran z mikrokontrolerom ESP32, ki deluje kot posrednik med senzorji in glavnim računalnikom Raspberry Pi 5. Ta integracija omogoča učinkovito delitev podatkov in hitro obdelavo, kar prispeva k celoviti avtomatizaciji in natančnosti eksperimenta. Z uporabo protokola SPI in modula Adafruit MAX31865 za pretvorbo signalov iz senzorjev PT100 sistem zagotavlja visoko natančnost, zanesljivost in učinkovitost pri merjenju temperature. To omogoča natančno regulacijo temperaturnih pogojev, kar je ključno za uspešno izvajanje eksperimenta difuzije nevtronov v vodi.

5.4 Rele in upravljanje grelca

Releji so ključni elementi za nadzor električnih tokov v eksperimentalnem sistemu, zlasti pri upravljanju grelca, ki je odgovoren za regulacijo temperature vode. V našem sistemu uporabljamo releje Songle, ki omogočajo zanesljivo in učinkovito upravljanje grelca na podlagi določenih pogojev, kar zagotavlja stabilno delovanje eksperimenta in varnost sistema.

Specifikacije relejev

Za naš eksperiment smo izbrali 2-kanalne relejske module Songle z naslednjimi specifikacijami:

- Nominacija toka in napetosti: 10 A, 250 V AC, kar omogoča varno in učinkovito upravljanje grelca, ki deluje na višjih tokovih in napetostih.
- Število kanalov: Dva, kar nam omogoča ločeno upravljanje dveh različnih delov sistema ali implementacijo dodatnih varnostnih mehanizmov.
- Napajanje: Releji delujejo na napetosti med 3,3 V in 5 V DC, kar omogoča enostavno integracijo z mikrokontrolerji, kot sta Raspberry Pi 5 in ESP32.
- Logika delovanja: Releji so aktivirani, ko je stanje pina nizko (GND), kar pomeni, da se rele prižge le, če je signal na pinu v stanju nizkega napetostnega signala.

5.4.1 Upravljanje grelca

Za nadzor grelca uporabljamo dva releja, povezana z Raspberry Pi 5 in ESP32. Upravljanje grelca je pogojeno z istovetnostjo obeh naprav, kar zagotavlja dodatno raven varnosti in preprečuje neželeno delovanje grelca. Postopek delovanja je naslednji:

Pogoji za prižig grelca:

- Rele št. 1 (ESP32): Da se prižge grelec, mora biti rele št. 1 aktiviran, kar pomeni, da je pin ESP32 v stanju nizke napetosti (GND).
- Rele št. 2 (Raspberry Pi 5): Rele št. 2 mora biti deaktiviran, kar pomeni, da mora biti pin Raspberry Pi 5 v stanju visoke napetosti (3,3 V).

Logika delovanja:

- Zagotavljanje varnosti: Samo če sta oba pogoja izpolnjena – rele št. 1 je prižgan (ESP32 je v pravem stanju) in rele št. 2 je ugasnjen (Raspberry Pi 5 ne aktivira releja) –, se grelec prižge. Ta logika preprečuje, da bi se grelec prižgal brez ustreznega nadzora, in zagotavlja, da oba nadzorna sistema delujeta skladno.
- Preprečevanje napak: Ta dvojni varnostni ukrep zmanjšuje tveganje za pregrevanje ali druge varnostne incidente, saj zahteva aktivno sodelovanje obeh kontrolnih enot.

5.4.2 Integracija relejev v sistem

Releji so integrirani v sistem prek pinov GPIO na Raspberry Pi 5 in ESP32, kar omogoča enostavno komunikacijo in nadzor. Vsak rele modul je povezan z ustreznim mikrokontrolerjem prek digitalnih izhodov, ki nadzorujejo stanje relejev glede na logiko delovanja sistema.

Povezava relejev:

- Rele št. 1 (ESP32): Povezan na enega od pinov GPIO na ESP32, ki ga programiramo tako, da pošilja nizek signal (GND) samo, ko so izpolnjeni določeni pogoji meritev ali nadzora.
- Rele št. 2 (Raspberry Pi 5): Povezan na enega od pinov GPIO na Raspberry Pi 5, ki ga programiramo prek glavnega nadzornega programa, da pošilja ali ne pošilja nizkega signala glede na stanje meritev in nadzora temperature.

5.4.3 Varnost in zanesljivost

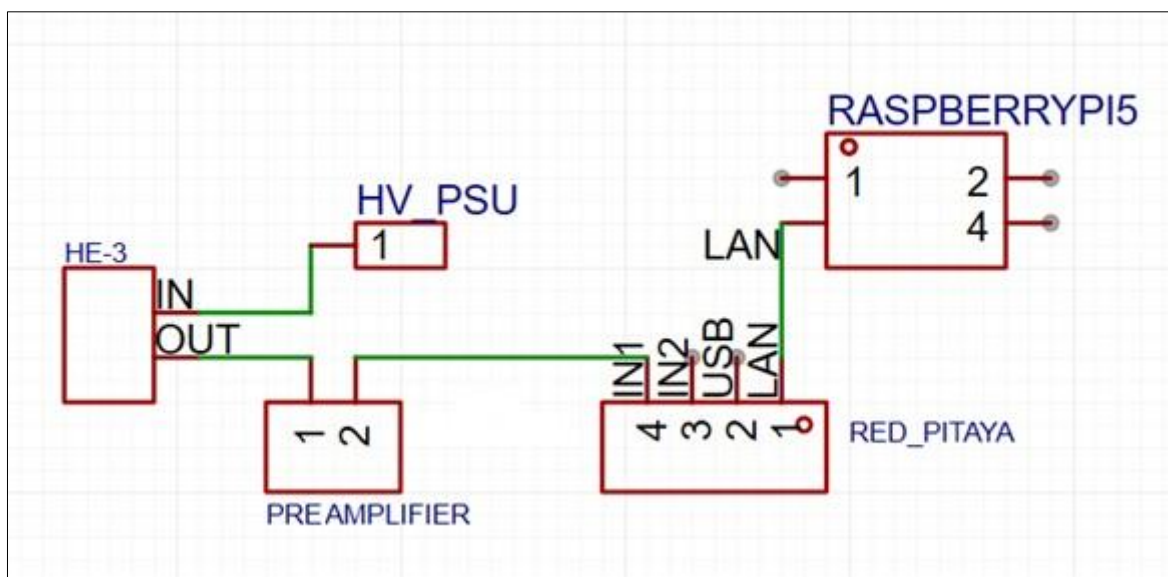
Integracija dveh relejev za nadzor grelca povečuje varnost sistema, saj zagotavlja, da grelec deluje samo pod strogim nadzorom obeh kontrolnih enot. Ta pristop preprečuje nepredvidene ali nenadzorovane situacije, ki bi lahko privedle do pregrevanja ali drugih varnostnih tveganj.

- Redundantnost: Uporaba dveh relejev zagotavlja, da če ena kontrolna enota odpove ali deluje nepravilno, druga še vedno lahko zagotovi varnostni izklop grelca.
- Hitrost odziva: Releji delujejo hitro in zanesljivo, kar omogoča takojšnjo reakcijo na spremembe v stanju sistema.
- Varnostni mehanizmi: Samodejni izklop grelca pri previsoki temperaturi in zaščita pred prelivanjem vode dodatno povečujeta varnost sistema.

5.4.4 Red Pitaya FPGA za zajem signalov

Red Pitaya FPGA je napredna naprava, ki se uporablja za zajem in obdelavo električnih signalov v realnem času. V našem eksperimentalnem sistemu za proučevanje difuzije nevtronov v vodi Red Pitaya deluje kot strežnik DAQ (angl. Data Acquisition), ki omogoča visoko zmogljivost in natančnost pri zajemu nevtronskih signalov (slika 7). Uporabljamo model STEMLAB 125-14, ki je opremljen z jedrom FPGA (angl. Field-Programmable Gate Array), kar omogoča prilagodljivo in hitro obdelavo podatkov.

Slika 7: Shema DAQ



Vir: Inštitut Jožefa Stefan F8, december 2024.

5.4.5 Specifikacije in delovanje

Red Pitaya STEMLAB 125-14 je zasnovan za visoko zmogljivostne aplikacije, kjer je potrebna hitra obdelava velikih količin podatkov. Ta model podpira maksimalni zajem do 100.000 vzorcev na sekundo, kar je bistveno za natančno detekcijo in analizo nevtronskih dogodkov. Jedro FPGA omogoča izvajanje kompleksnih algoritmov za filtriranje, diskriminacijo oblik pulzov (PSD) in druge obdelave signalov v realnem času, kar je ključno za natančne meritve difuzije nevtronov.

5.4.6 Integracija v sistem

Red Pitaya deluje kot strežnik DAQ, kar pomeni, da zajema podatke iz detektorja He-3 in jih nato posreduje naprej za obdelavo. Podatki se prenašajo prek Ethernet povezave do glavnega računalnika Raspberry Pi 5, kjer jih prejme Julia skripta. Ta skripta izvaja dodatno obdelavo in analizo podatkov, kar omogoča vizualizacijo in shranjevanje rezultatov v datoteke CSV za nadaljnjo analizo.

5.4.7 Operacijski sistem in namestitev

Za postavitev strežnika DAQ na Red Pitayu uporabljamo Linux Alpine, lahki operacijski sistem, ki je optimiziran za zmogljivost in zanesljivost. Sistem je naložen na kartico SD, ki je vstavljena v Red Pitayo. Kartica SD vsebuje image strežnika DAQ, ki omogoča inicializacijo sistema. Ko je Red Pitaya vklopljen, se sistem avtomatsko zažene s kartice SD in začne zajem podatkov brez potrebe po dodatni konfiguraciji.

5.4.8 Prednosti uporabe Red Pitaya FPGA

Uporaba Red Pitaya FPGA v našem eksperimentu prinaša več ključnih prednosti:

- Visoka hitrost zajema: Z maksimalnim zajemom 100.000 vzorcev na sekundo omogoča natančno zaznavanje in analizo hitrih nevtronskih signalov.
- Prilagodljivost: Jedro FPGA omogoča enostavno prilagajanje in implementacijo novih algoritmov za obdelavo signalov, kar povečuje prilagodljivost sistema.
- Realno časovna obdelava: Omogoča izvajanje kompleksnih obdelav v realnem času, kar je ključno za natančno in hitro analizo podatkov.
- Enostavna integracija: Ethernet povezava omogoča enostavno integracijo z obstoječimi komponentami sistema, kot je Raspberry Pi 5, in zagotavlja zanesljiv prenos podatkov.

6 NAČRTOVANJE IN IZVEDBA PROGRAMSKE OPREME

Načrtovanje in izvedba programske opreme sta ključnega pomena za uspešno avtomatizacijo sistema za proučevanje difuzije nevtronov v vodi. Programska oprema povezuje vse strojne komponente, omogoča zajem in obdelavo podatkov ter zagotavlja intuitivno uporabniško izkušnjo prek grafičnega uporabniškega vmesnika (GUI). Glavna programska platforma je Raspberry Pi 5, na kateri je pognana aplikacija Python, ki vključuje nadzor nad koračnim motorjem, temperaturnimi senzorji, grelcem in drugimi varnostnimi mehanizmi. Podatki iz Red Pitaya FPGA se prenašajo prek mreže in jih obdeluje skripta Julia na Raspberry Pi.

6.1 Arhitektura sistema

Arhitektura sistema temelji na modularnem pristopu, ki zagotavlja pregledno in učinkovito integracijo vseh komponent.

6.1.1 Raspberry Pi 5 kot osrednji nadzorni sistem

Operacijski sistem, ki se uporablja za delovanje sistema, je Linux (npr. Raspberry Pi OS), kar zagotavlja stabilno in zanesljivo okolje za izvajanje aplikacije. Osrednja aplikacija Python nadzoruje vse strojne komponente prek pinov GPIO, omogoča komunikacijo z napravami, kot sta ESP32 in Red Pitaya, ter obdeluje podatke v realnem času. Uporabniški vmesnik (GUI), razvit s knjižnicama tkinter in customtkinter, omogoča intuitivno upravljanje sistema. GUI prikazuje ključne podatke, kot so trenutna temperatura, CPS (število dogodkov na sekundo) in položaj vodila, ter vključuje kontrole za ročno in avtomatizirano upravljanje eksperimenta, kar olajša uporabo in spremljanje eksperimentalnih pogojev.

6.1.2 Mikrokrmilnik ESP32 za lokalno upravljanje senzorjev

ESP32 deluje kot ključna komponenta za zajem podatkov in varnost v eksperimentalnem sistemu. Mikrokrmilnik komunicira s petimi temperaturnimi senzorji PT100 prek protokola SPI, pri čemer se uporabljajo moduli Adafruit MAX31865 za pretvorbo signalov. Zbrani podatki omogočajo natančen nadzor temperature sistema. Za zagotavljanje varnosti ESP32 kontinuirano spremlja povprečno temperaturo vseh senzorjev. Če temperatura preseže 85 °C, mikrokrmilnik samodejno deaktivira rele za grelec, kar preprečuje pregrevanje in morebitne poškodbe sistema. Povprečni temperaturni podatki se prek protokola UART prenesejo na Raspberry Pi 5, kjer se dodatno obdelajo in uporabijo za vizualizacijo in regulacijo sistema. Ta integracija omogoča natančno spremljanje temperaturnih pogojev in zagotavlja visoko raven varnosti med eksperimentom.

6.1.3 Red Pitaya FPGA za zajem signalov

Red Pitaya STEMLAB 125-14 deluje kot zmogljiv strežnik DAQ (angl. Data Acquisition), ki omogoča zajem signalov s hitrostjo do 100.000 vzorcev na sekundo. Ta visoka frekvenca zajema zagotavlja natančne meritve, potrebne za detekcijo in analizo nevtronskih dogodkov.

Zajeti, podatki se prek Ethernet povezave, prenašajo na Raspberry Pi 5, kjer jih obdeluje skripta Julia. Ethernet povezava zagotavlja zanesljiv in hiter prenos velikih količin podatkov, kar je bistveno za realno-časovno obdelavo signalov. Skripta Julia izvaja napredne metode za obdelavo signalov, vključno z diskriminacijo oblike pulzov (PSD) in filtriranjem šuma. Tehnika PSD omogoča ločevanje nevtronskih dogodkov od drugih signalov, kot so gama razpad ali šum, s čimer se zagotovi natančnost detekcije. Ta kombinacija hitrega zajema podatkov, zanesljivega prenosa in napredne obdelave signalov zagotavlja kakovostne meritve za analizo difuzije nevtronov.

6.1.4 Varnostni in nadzorni mehanizmi

Končna stikala so nameščena na obeh skrajnih točkah vodila in delujejo kot varnostni mehanizem za preprečevanje, da bi detektor presegel dovoljene meje gibanja. Ko stikalo zazna, da je detektor dosegel mejo, sistem avtomatsko ustavi koračni motor, s čimer se preprečijo poškodbe opreme ali napačne meritve. Rele za grelec je zasnovan tako, da zagotavlja varno delovanje. Za vklop grelca morata biti izpolnjena dva pogoja: rele na ESP32 mora biti aktiviran, medtem ko mora biti rele na Raspberry Pi neaktiven. Ta dvojni nadzor preprečuje nenadzorovane ali napačne vklopne pogoje grelca, kar izboljšuje zanesljivost in varnost sistema. Gumbi zaustavitve v sili so strateško nameščeni in omogočajo takojšnjo prekinitve delovanja celotnega sistema v primeru izrednih razmer. Ob aktivaciji gumba se sistem zaustavi, koračni motor in grelec se izklopita, s čimer se zagotovi varnost opreme in operaterjev. Ta funkcija je bistvena za zmanjšanje tveganj med izvajanjem eksperimenta.

6.1.5 Shranjevanje in obdelava podatkov

Beleženja podatkov o meritvah se shranjujejo v datoteke CSV, kar omogoča nadaljnjo analizo in vizualizacijo. Obdelavo podatkov CPS generira skripta Julia, in sicer podatke o nevtronskih dogodkih, ki se v realnem času prikažejo v GUI in shranjujejo za nadaljnjo analizo.

6.2 Razvoj grafičnega uporabniškega vmesnika (GUI)

Grafični uporabniški vmesnik (GUI) omogoča upravljanje sistema in spremljanje eksperimentalnih podatkov.

6.2.1 Pregled knjižnic tkinter in customtkinter

Tkinter je standardna knjižnica za razvoj grafičnih uporabniških vmesnikov v Pythonu. Njegova prednost je integracija z večino okolij Python, kar omogoča hitro in enostavno implementacijo osnovnih funkcionalnosti GUI. Tkinter podpira širok nabor gradnikov, kot so gumbi, vnosna polja, okna s sporočili in prikaz grafikonov z zunanjo integracijo, kot je Matplotlib (The Python Software Foundation, b.l.).

Glavne značilnosti:

- preprosta uporaba in široka dokumentacija,
- dobra združljivost z različnimi operacijskimi sistemi,
- osnovna podpora za prilagoditev postavitve.

Customtkinter je razširitev knjižnice tkinter, ki omogoča ustvarjanje sodobnih in vizualno privlačnih uporabniških vmesnikov z možnostjo prilagajanja tem in videza (CustomTkinter, b.l.). Glavne značilnosti:

- podpora za temne in svetle teme,
- estetski in sodoben videz GUI,
- večja prilagodljivost gradnikov, kot so gumbi, vnosna polja in meniji.

6.2.2 Postavitev in komponente GUI

Uporabniški vmesnik je zasnovan tako, da uporabniku zagotavlja hiter dostop do ključnih funkcionalnosti in informacij o sistemu. Postavitev vključuje jasno organizacijo komponent, ki so razporejene glede na njihove funkcije.

6.2.2.1 Postavitev GUI

Statusna vrstica se nahaja na desni strani zaslona in prikazuje trenutno stanje sistema, vključno z regulacijo temperature, delovanjem grelca, pozicijo detektorja in drugimi pomembnimi informacijami. Na sliki 8 je prikazan grafični prikaz programa.

Glavni grafi:

- Nevtronski graf prikazuje število nevtronskih dogodkov na sekundo (CPS) v zadnjih petih minutah.
- Temperaturni graf vizualizira zgodovino temperature za zadnjih pet minut.

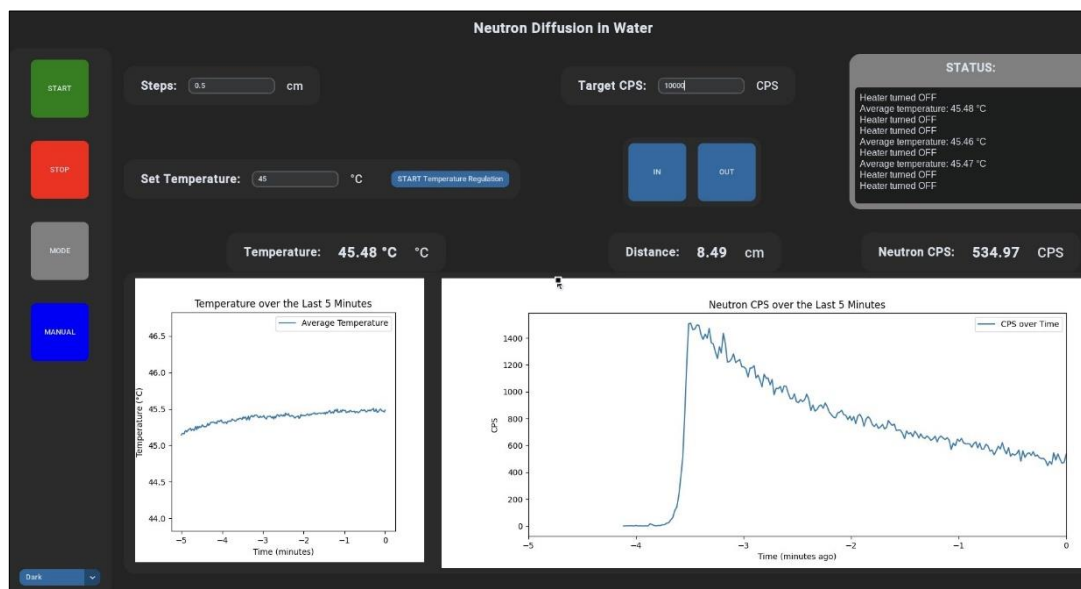
Vnosna polja in kontrole:

- Na sredini zaslona je območje za vnos parametrov, kot so ciljni CPS, temperatura in koraki gibanja.
- Ročne kontrole za premikanje vodila (»IN«, »OUT«) so nameščene nad prikazom trenutne pozicije vodila v cm.

Prikaz trenutnih vrednosti:

- Trenutna temperatura, CPS in položaj detektorja so prikazani v ločenih oknih za hitro preverjanje.

Slika 8: Grafični prikaz programa



Vir: lasten.

6.2.2.2 Komponente GUI

Gumbi za nadzor:

- Gumbi »START«, »STOP« in »MODE« omogočajo začetek in prekinitev eksperimenta ter preklapljanje med različnimi načini delovanja.
- Gumb »MANUAL« odpira dodatno okno za podrobna navodila upravljanje sistema.

Polja za vnos parametrov:

- polja za vnos ciljne temperature, CPS in korakov gibanja.
- Grafi in vizualizacija:
- matplotlib grafi za prikaz sprememb temperature in CPS v realnem času.

Varnostni prikaz:

- opozorilna sporočila v primeru prekoračitev temperature ali aktiviranja končnih stikal.

6.3 Algoritmi za nadzor

Algoritmi za nadzor v eksperimentalnem sistemu so ključni za učinkovito upravljanje koračnega motorja in regulacijo temperature. Ti algoritmi so zasnovani tako, da zagotavljajo natančno in varno delovanje, pri čemer združujejo avtomatizirane postopke s sprotnim spremljanjem ključnih parametrov.

6.3.1 Nadzor koračnega motorja

Nadzor koračnega motorja je bistvenega pomena za natančno premikanje detektorja He-3 vzdolž vodila. Sistem uporablja Raspberry Pi 5 za nadzor motorja prek pinov GPIO, pri čemer se signali pošiljajo v obliki nizov impulzov, ki določajo število korakov in smer gibanja.

Parametri gibanja:

- Koraki motorja so določeni glede na vneseno razdaljo v centimetrih, pri čemer sistem uporablja konstanto korakov na centimeter za kalibracijo gibanja.
- Hitrost motorja je omejena, da zagotavlja gladko in natančno premikanje brez tresljajev.

Implementacija algoritma:

- Algoritem začne premikanje motorja šele po preverjanju končnih stikal, da se prepreči prekoračitev dovoljenega območja gibanja.

- Motor se premika v korakih, dokler ne doseže ciljne razdalje, pri čemer se sproti spremlja stanje končnih stikal.
- Po zaključku gibanja sistem potrdi novo pozicijo in jo zabeleži v GUI.

Varnostni mehanizmi:

- Sistem vključuje gumb za zaustavitev v sili, ki takoj prekine gibanje motorja.
- Končna stikala preprečujejo, da bi detektor presegel skrajne točke vodila.

6.3.2 Regulacija temperature

Regulacija temperature je ključna za zagotavljanje stabilnih pogojev med eksperimentom. Sistem uporablja povprečne vrednosti temperature iz petih senzorjev PT100, ki so povezani z ESP32 prek protokola SPI.

Izračun povprečne temperature:

- ESP32 kontinuirano zbira podatke s senzorjev in izračunava povprečno temperaturo.
- Povprečna temperatura se posreduje Raspberry Pi 5 prek protokola UART za vizualizacijo in nadaljnjo obdelavo.

Algoritem za regulacijo:

- Če povprečna temperatura pade pod ciljno vrednost, sistem aktivira rele za grelec.
- Ko temperatura doseže ali preseže ciljno vrednost, grelec izklopi, da prepreči pregrevanje.
- V primeru, da temperatura preseže 85 °C, ESP32 samodejno deaktivira rele, kar prepreči morebitne poškodbe opreme.

Prilagodljivost:

- Algoritem omogoča nastavitev tolerance okoli ciljne temperature, kar zagotavlja bolj gladko regulacijo brez prekomernega vklapljanja in izklapljanja grelca.

6.4 Zajem podatkov in beleženje

Zajem podatkov in njihovo beleženje sta ključna vidika za zagotavljanje natančne analize eksperimenta difuzije nevtronov v vodi. Sistem omogoča sprotno pridobivanje in shranjevanje podatkov, kot so število nevtronskih dogodkov na sekundo (CPS), povprečne temperature in položaj detektorja. Podatki so strukturirani in zapisani v datoteke CSV, kar omogoča nadaljnjo analizo in vizualizacijo rezultatov.

6.4.1 Integracija s programskim jezikom Julia

Za obdelavo signalov iz naprave Red Pitaya FPGA (Red Pitaya. (b.l.)) je uporabljena skripta, napisana v programskem jeziku Julia, ki omogoča hitro in učinkovito procesiranje zajetih podatkov. Julia skripta izvaja napredne tehnike za obdelavo signalov, vključno z diskriminacijo oblike pulzov (PSD) in odstranjevanjem šuma, kar zagotavlja zanesljivo detekcijo nevtronskih dogodkov. Podatki se zajemajo z Red Pitayo pri hitrosti do 100.000 vzorcev na sekundo, kar omogoča podrobno analizo nevtronskih signalov. Integracija skripte Julia z Raspberry Pi je zasnovana tako, da skripta kontinuirano posreduje obdelane podatke o CPS prek Ethernet povezave. Sistem Raspberry Pi spremlja delovanje skripte in jo po potrebi samodejno ponovno zažene, če pride do prekinitve prenosa podatkov. Na ta način sta zagotovljena zanesljivost in konsistentnost prenosa podatkov med celotnim eksperimentom.

6.4.2 Upravljanje datotek CSV

Za beleženje podatkov sistem uporablja datoteke CSV, ki omogočajo pregledno strukturo in enostavno analizo rezultatov eksperimenta. Vsaka datoteka vsebuje stolpce za časovni žig, položaj detektorja, CPS, povprečno temperaturo in druge parametre, pomembne za analizo eksperimenta. Časovni žigi omogočajo natančno sledljivost podatkov in povezovanje meritev z določenimi trenutki med izvajanjem eksperimenta. Proces zapisovanja podatkov v datoteke CSV poteka avtomatsko. Ob začetku eksperimenta sistem generira datoteko, katere ime vključuje trenutni datum in čas (npr. dd.mm.yy_hh.mm.ss.csv). Med eksperimentom se podatki beležijo sproti, pri čemer se po vsakem zapisu datoteka osveži, da se prepreči izguba podatkov v primeru prekinitve. Ta proces omogoča neprekinjeno in zanesljivo beleženje, kar je bistveno za analizo in ponovljivost eksperimenta.

6.5 Mehanizmi za varnost in obravnavanje napak

Mehanizmi za varnost in obravnavanje napak so ključnega pomena za nemoteno in varno delovanje sistema za proučevanje difuzije nevtronov. Poglavja v nadaljevanju obravnavajo povezovanje elektronskih komponent, programiranje mikrokrmilnika, integracijo grelnega sistema, konfiguracijo gonilnika koračnega motorja ter kalibracijo in integracijo temperaturnih senzorjev.

6.5.1 Povezovanje elektronskih komponent

Elektronske komponente, kot so temperaturni senzorji, releji, grelec, koračni motor in varnostni mehanizmi, so povezane z Raspberry Pi 5 in ESP32 prek standardnih komunikacijskih protokolov (SPI, UART in GPIO). Vse komponente so povezane na način, ki zagotavlja stabilno in zanesljivo delovanje sistema. Poseben poudarek je na uporabi kakovostnih kablov in zaščite pred elektromagnetnimi motnjami (EMI), kar zmanjšuje možnost napak.

6.5.2 Programiranje mikrokrmilnika

Mikrokrmilnik ESP32 je programiran za zbiranje podatkov iz temperaturnih senzorjev PT100 prek modulov Adafruit MAX31865, ki uporabljajo protokol SPI. ESP32 kontinuirano izračunava povprečno temperaturo in preverja, ali ta presega 85 °C. V primeru prekoračitve temperature mikrokrmilnik samodejno deaktivira rele za grelec, kar prepreči pregrevanje. Povprečni temperaturni podatki se nato prenašajo na Raspberry Pi 5 prek protokola UART, kjer se uporabljajo za nadaljnjo obdelavo.

6.5.3 Integracija releja in grelnega sistema

Za regulacijo temperature vode se uporabljata dva releja, ki sta povezana z ESP32 in Raspberry Pi 5. Releji morajo izpolnjevati določene pogoje, da se grelec aktivira: rele na ESP32 mora biti vklopljen, medtem ko mora biti rele na Raspberry Pi izklopljen. Ta dvojni varnostni mehanizem zagotavlja, da se grelec vklopi le, če oba sistema delujeta pravilno. Releji podjetja Songle omogočajo tok do 10 A pri 250 V, kar zagotavlja zanesljivost in dolgo življenjsko dobo.

6.5.4 Konfiguracija gonilnika koračnega motorja

Gonilnik koračnega motorja je konfiguriran za natančno premikanje detektorja vzdolž vodila. Motor je povezan z Raspberry Pi 5 prek pinov GPIO, ki omogočajo nadzor smeri in števila korakov. Algoritem zagotavlja gladko premikanje, pri čemer se pozicija motorja sproti preverja glede na podatke iz končnih stikal, kar preprečuje prekoračitev dovoljenega gibanja. Konfiguracija vključuje tudi možnost hitre zaustavitve motorja v primeru aktivacije gumbov za nujno zaustavitev.

6.5.5 Kalibracija in integracija temperaturnih senzorjev

Pet temperaturnih senzorjev PT100 je interno kalibriranih, kar pomeni, kadar je temperatura 0 °C, je interni upor 100 ohm. Senzorji so povezani z moduli Adafruit MAX31865, ki omogočajo pretvorbo signalov v digitalno obliko prek protokola SPI. Povprečne temperature, izračunane na ESP32, se uporabljajo za regulacijo grelca in spremljanje temperaturnih pogojev. Kalibracija vključuje preverjanje natančnosti senzorjev pri različnih temperaturah in prilagoditev sistema za optimalno delovanje.

7 ZAJEM PODATKOV IN OBDELAVA SIGNALOV

To poglavje se osredotoča na proces pridobivanja in obdelave signalov iz detektorja. Predstavljen je pregled skripte v jeziku Julia, ki analizira podatke, zajete z napravo FPGA Red Pitaya. Podrobneje so opisane ključne tehnike digitalne obdelave signalov, kot sta

filtriranje šuma in korekcija osnovne linije. Poseben poudarek je na uporabi metode diskriminacije oblike pulza (PSD) za učinkovito ločevanje nevtronskih dogodkov od gama ozadja in šuma, kar je bistveno za natančnost meritev.

7.1 Pregled skripte Julia za detekcijo nevtronov

Skripta Julia je specializirana skripta, napisana v programskem jeziku Julia (b.l.), ki se uporablja za obdelavo podatkov, pridobljenih iz naprave FPGA Red Pitaya. Njena naloga je zaznavanje nevtronskih dogodkov in obdelava signalov v realnem času, kar zagotavlja zanesljive in natančne meritve.

Osnovne funkcionalnosti skripte Julia:

- Zajem signalov: Skripta Julia prejema podatke iz Red Pitaya, ki zajema signale s hitrostjo do 100.000 vzorcev na sekundo.
- Filtriranje šuma: Uporablja nizkoprepustni filter (Butterworth), ki odstranjuje visokofrekvenčni šum in zagotavlja jasnejšo sliko signalov.
- Korekcija osnovne vrednosti: Izračunava in odšteva osnovno raven signala, da se odstrani ozadje, kar omogoča bolj natančno zaznavanje pulzov.
- Diskriminacija oblike pulza (PSD): Analizira razmerje med hitro in skupno komponento pulza, da loči nevtronske dogodke od drugih, kot so gama žarki ali šum.

Postopek delovanja:

- Priprava signala: Signal se zajame z Red Pitayo in prenese na Raspberry Pi prek Ethernet povezave.
- Obdelava signala: Skripta uporablja napredne algoritme za filtriranje in analizo, s čimer izloči šum in identificira pomembne dogodke.
- Zaznavanje nevtronov: Uporaba PSD zagotavlja natančno ločevanje nevtronov od neželenih signalov, kar je ključno za natančne meritve.
- Beleženje podatkov: Detektirani dogodki se shranjujejo v datoteke CSV z oznako časa, kar omogoča nadaljnjo analizo.

7.2 Konfiguracija Red Pitaya FPGA

Red Pitaya FPGA STEMLAB 125-14 je ključna naprava za zajem in obdelavo signalov v sistemu za proučevanje difuzije nevtronov. Deluje kot strežnik DAQ, ki je omejen na hitrost zajema 100.000 vzorcev na sekundo in omogoča povezavo z Raspberry Pi prek Ethernet povezave. Konfiguracija Red Pitaya vključuje nastavitve zajema, obdelavo signalov in pripravo podatkov za nadaljnjo analizo s skripti Julia.

Osnovna konfiguracija Red Pitaya:

- Decimacija: Nastavljena na 1250, kar omogoča zajem signalov pri hitrosti 100 kS/s. ($125.000.000 / 1250 = 100.000$).
- Okvirji in vzorci: Sistem zajema 16.384 vzorcev na obdobje, s čimer zagotavlja dovolj podatkov za natančno analizo signalov.
- Prenos podatkov: Signalni podatki se kontinuirano prenašajo na Raspberry Pi, kjer jih obdeluje Julia.

7.2.1 Tehnike digitalne obdelave signalov

Digitalna obdelava signalov v Red Pitaya FPGA vključuje nizkoprepustno filtriranje, korekcijo osnovne vrednosti in prilagodljivo določanje praga. Te tehnike so ključne za odstranitev šuma, prilagoditev signalov in natančno zaznavanje nevtronskih dogodkov.

7.2.1.1 Nizkoprepustno filtriranje

Nizkoprepustno filtriranje je prvi korak v procesu obdelave signalov, ki odstranjuje visokofrekvenčne komponente in šum:

- Metoda: Uporablja se Butterworthov nizkoprepustni filter petega reda z mejno frekvenco 40 kHz.
- Cilj: Odstraniti visokofrekvenčni šum, ki ga povzročajo neželen šum ali motnje v sistemu.
- Rezultat: Signal postane bolj jasen in primeren za nadaljnjo obdelavo, kar omogoča natančno zaznavanje nevtronskih dogodkov.

7.2.1.2 Korekcija izhodiščne vrednosti

Korekcija izhodiščne vrednosti je postopek, pri katerem od signala detektorja odštejemo ocenjeno osnovno raven (ozadje), ki je prisotna tudi brez pulzov. S tem odpravimo vpliv offseta in počasnih nestabilnosti sistema ter zagotovimo, da se pulzi začnejo blizu ničle, kar omogoča natančnejše zaznavanje in analizo pulzov:

- Postopek: Osnovna raven signala se izračuna kot povprečje prvih 10.000 vzorcev, ki se nato odšteje od celotnega signala.
- Cilj: Prilagoditi signal na ničelno izhodišče, kar izboljša natančnost zaznavanja pulzov.
- Rezultat: Izločitev neželenih offsetov omogoča boljšo interpretacijo amplitude signalov in ločitev med nevtronskimi dogodki in šumom.

7.2.1.3 Prilagodljivo določanje praga

Prilagodljivo določanje praga zagotavlja natančno zaznavanje pulzov glede na trenutne razmere v signalu:

- Postopek: Prag za zaznavanje pulzov se določi na podlagi povprečja in standardnega odklona osnovne vrednosti signala. Prag je nastavljen na petkratnik standardnega odklona nad osnovno vrednostjo.
- Cilj: Omogočiti zaznavanje šibkih nevtronskih signalov ob hkratnem izločanju šuma.
- Rezultat: Prilagodljiv prag izboljša zanesljivost sistema, saj se prilagaja trenutnim razmeram in zagotavlja natančno zaznavanje dogodkov.

7.3 Uporaba PSD za diskriminacijo pulzov

Diskriminacija oblike pulzov (angl. Pulse Shape Discrimination – PSD) je ključna tehnika za ločevanje nevtronskih dogodkov od drugih signalov, kot so gama žarki ali šum. Glavni viri signalov, ki jih filtriramo, so gama žarki, ki izvirajo tako iz Am-Be vira kot tudi iz interakcij nevtronov z okolico in naravnega ozadja, ter elektronski šum in druge motnje. Gama žarki v detektorju He-3 povzročijo pulze z drugačno obliko (hitrejšim upadom) kot nevtroni (ki ustvarijo proton in triton z gostejšo ionizacijsko sledjo), medtem ko imajo šumni pulzi pogosto netipične oblike. Z analizo razmerja med hitro in počasnejšo komponento vsakega pulza (njegove oblike) PSD omogoča zanesljivo identifikacijo in štetje nevtronskih dogodkov ter zavračanje večine pulzov, ki izvirajo iz gama žarkov ali šuma, tudi če ti presežejo osnovni amplitudni prag.

7.3.1 Spremljanje in beleženje podatkov v realnem času

Uporaba PSD v našem sistemu vključuje sprotno spremljanje signalov, diskriminacijo pulzov in shranjevanje obdelanih podatkov za nadaljnjo analizo.

Postopek analize PSD:

- Pridobivanje signala: Signal, zajet z Red Pitaya FPGA, se pošlje skripti Julia za obdelavo.
- Izračun komponent:
 - Hitri del: Izračuna se s seštevanjem prvih 50 vzorcev pulza, ki predstavljajo začetni del signala.
 - Skupni del: Izračuna se s seštevanjem vseh vzorcev celotnega pulza.
- Izračun razmerja PSD: Razmerje PSD se izračuna kot:

$$\text{PSD razmerje} = \text{Hitri del} / \text{Skupni del} \dots\dots\dots(7.1)$$

- Kalibracija praga: Na podlagi predhodne kalibracije se določi prag za razmerje PSD, ki loči nevtronske dogodke od drugih signalov.

Spremljanje podatkov v realnem času omogoča, da se obdelani podatki, vključno z razmerji PSD, sproti prikazujejo v grafičnem uporabniškem vmesniku (GUI) na Raspberry Pi. Trenutno število nevtronskih dogodkov na sekundo (CPS) se posodablja v realnem času, kar uporabniku omogoča sprotno spremljanje eksperimenta in prilagoditve v skladu s trenutnimi razmerami. Hkrati se podatki o detektiranih nevtronskih dogodkih, vključno z njihovimi časovnimi žigi in razmerji PSD, beležijo v datoteke CSV. Beleženje poteka v realnem času, kar zagotavlja enostavno analizo in vizualizacijo podatkov po zaključku eksperimenta. Uporaba PSD za diskriminacijo pulzov prinaša številne prednosti, med katerimi je ključna natančnost, saj omogoča zanesljivo ločevanje med nevtroni in gama žarki ter zmanjšuje lažno pozitivne dogodke. Poleg tega sistem zaradi prilagodljivosti samodejno prilagaja pragove glede na trenutne razmere v signalu, kar izboljšuje zanesljivost delovanja. Spremljanje in beleženje podatkov v realnem času zagotavljata tudi sprotnost, kar omogoča takojšnje prilagoditve eksperimentalnih pogojev in večjo učinkovitost raziskovalnega procesa.

8 FUNKCIONALNOST GRAFIČNEGA VMESNIKA (GUI)

Grafični uporabniški vmesnik (GUI) je osrednji del sistema, ki omogoča enostavno upravljanje in spremljanje eksperimenta v realnem času. GUI je zasnovan z uporabo knjižnic tkinter in customtkinter, kar zagotavlja funkcionalno okolje za uporabnike. Njegova glavna naloga je združevanje ključnih funkcionalnosti, kot so spremljanje podatkov, vizualizacija rezultatov in upravljanje sistemskih parametrov. Uporabniški vmesnik je razdeljen na več sekcij, ki uporabniku omogočajo intuitiven in neposreden dostop do vseh pomembnih funkcij. To vključuje prikaz trenutnih vrednosti, grafe, statusno vrstico in vnosna polja za nastavitve parametrov eksperimenta.

8.1 Postavitev glavnega zaslona

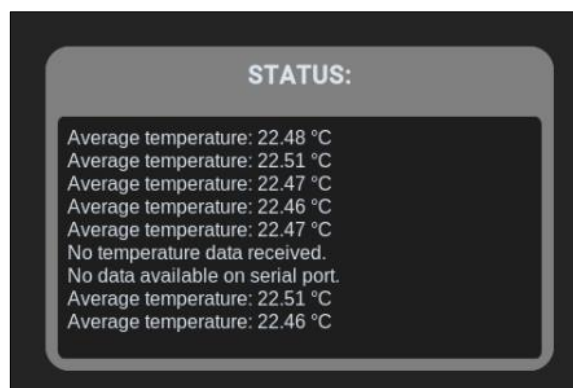
Glavni zaslon GUI je organiziran tako, da zagotavlja preglednost in enostavno uporabo. Na desni strani zaslona se nahaja statusna vrstica, ki uporabniku prikazuje trenutno stanje sistema. V tej vrstici so informacije o delovanju grelca, regulaciji temperature, položaju detektorja in drugih ključnih podatkih. Osrednji del GUI je namenjen prikazu grafov. Graf CPS (število nevtronskih dogodkov na sekundo) vizualizira zgodovino detekcije nevtronov za zadnjih pet minut, medtem ko temperaturni graf prikazuje povprečne temperature sistema za zadnjih pet minut. Ti grafi uporabniku omogočajo sprotno spremljanje eksperimentalnih pogojev in hitre prilagoditve, če je to potrebno. Pod grafi so vnosna polja za ključne parametre eksperimenta, kot so ciljni CPS, zeleno temperaturo in korake gibanja detektorja. Ročne kontrole za premikanje vodila (»IN« in »OUT«) so nameščene nad prikazom trenutne pozicije detektorja, ki je izražena v centimetrih. Ta funkcionalnost omogoča natančno

prilagoditev detektorja glede na eksperimentalne zahteve. Dodatno so trenutne vrednosti, kot so povprečna temperatura, CPS in položaj detektorja, prikazane v ločenih oknih, ki se sproti osvežujejo. Takšna organizacija zagotavlja uporabniku hiter dostop do vseh ključnih informacij in omogoča učinkovito upravljanje sistema. GUI je zasnovan tako, da uporabnika vodi skozi celoten eksperiment in zagotavlja optimalno izkušnjo ter natančno spremljanje rezultatov.

8.1.1 Funkcije statusne vrstice

Statusna vrstica se nahaja na desni strani zaslona in uporabniku omogoča sprotno spremljanje stanja sistema. Prikazuje ključne informacije, kot so trenutno stanje regulacije temperature, delovanje grelca (vklopljen/izklopljen) in opozorila o morebitnih napakah. Funkcija statusne vrstice je zagotoviti, da so vse pomembne informacije o delovanju sistema vedno vidne in enostavno dostopne (slika 9).

Slika 9: Grafični status okna

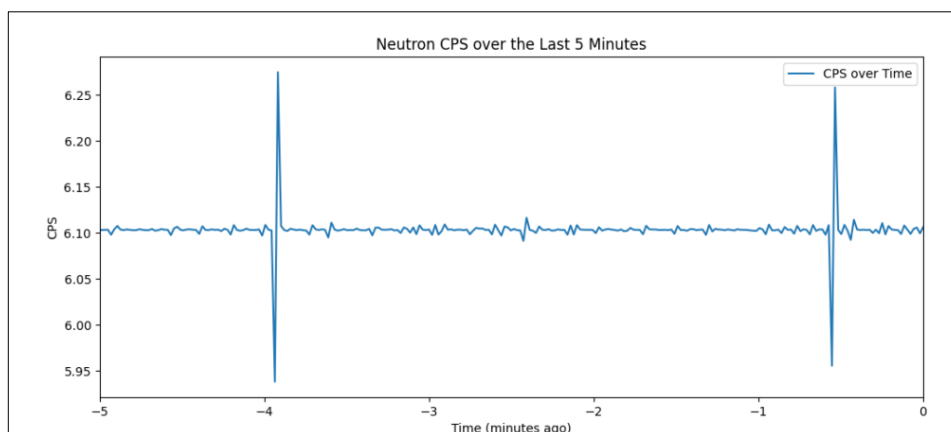


Vir: lasten.

8.1.2 Graf zgodovine CPS

Graf zgodovine CPS (število nevtronskih dogodkov na sekundo) je osrednji del vizualizacije podatkov v GUI. Prikazuje število nevtronskih dogodkov v realnem času in njihove spremembe v zadnjih petih minutah. Ta graf omogoča spremljanje stabilnosti detekcije nevtronov in pravočasno zaznavanje morebitnih nepravilnosti ali odstopanj. Podatki na grafu se sproti osvežujejo, kar zagotavlja uporabniku sproten pregled nad eksperimentalnimi pogoji (slika 10).

Slika 10: Grafični prikaz zgodovine CPS

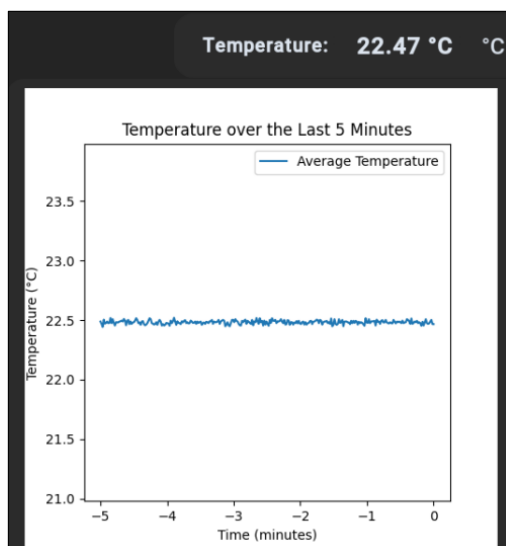


Vir: lasten.

8.1.3 Graf temperature

Graf temperature prikazuje zgodovino povprečne temperature v sistemu za zadnjih pet minut. Omogoča vizualizacijo stabilnosti temperaturnih pogojev in sprotno zaznavanje morebitnih temperaturnih nihanj. Ta graf je ključnega pomena za zagotavljanje, da temperatura ostaja znotraj zelenih meja, kar je bistveno za natančno izvajanje eksperimenta (slika 11).

Slika 11: Grafični prikaz temperature in zgodovine temperature



Vir: lasten.

8.1.4 Prikaz položaja vodila in nadzor

Položaj vodila je prikazan v ločenem oknu na zaslonu GUI, kjer je razdalja izražena v centimetrih. Poleg prikaza trenutne pozicije vodila so na voljo tudi ročne kontrole za premikanje detektorja, označene kot »IN« in »OUT«. Te kontrole omogočajo natančno prilagoditev položaja detektorja glede na eksperimentalne zahteve. Kombinacija vizualnega prikaza in neposrednega nadzora omogoča učinkovito upravljanje vodila (slika 12).

Slika 12: Grafični prikaz gumbov za premikanje vodila in realna dolžina



Vir: lasten.

8.2 Načini delovanja

Grafični uporabniški vmesnik (GUI) omogoča različne načine delovanja, ki so prilagojeni različnim potrebam eksperimenta. Glavni načini delovanja vključujejo samodejni način, način 1: čas merjenja, in način 2: čas do 10.000 štetij. Vsak način ponuja specifične funkcionalnosti za upravljanje sistema, zbiranje podatkov in prilagoditev eksperimenta glede na raziskovalne cilje.

8.2.1 Samodejni način

Samodejni način je najkompleksnejši in najbolj avtomatiziran način delovanja sistema. Omogoča uporabniku, da nastavi ključne parametre eksperimenta, kot so število korakov, cilj CPS in temperatura, pri čemer GUI samodejno upravlja premikanje detektorja, zbiranje podatkov in beleženje rezultatov.

8.2.1.1 Vnos parametrov: koraki, ciljno število nevtronskih sunkov, temperatura

Uporabnik v GUI vnese parametre za samodejni način, ki vključujejo:

- Koraki: Število korakov gibanja detektorja, izraženih v centimetrih. Sistem omogoča nastavitve dolžine posameznega koraka za prilagoditev eksperimentalnim zahtevam.
- Ciljno število nevtronskih sunkov: Želena število nevtronskih dogodkov na sekundo, ki določa trajanje meritev na posamezni točki.
- Temperatura: Zelena temperatura vode, ki jo sistem vzdržuje med eksperimentom.

8.2.1.2 *Zaporedje gibanja in meritev*

Po nastavitvi parametrov sistem začne premikati detektor proti nevtronskemu viru v vnaprej določenih korakih. Na vsaki točki sistem:

- Počaka, da temperatura doseže ciljno vrednost.
- Začne meritev, dokler se ne doseže ciljni CPS.
- Beleži podatke in nadaljuje na naslednjo točko.

Zaporedje gibanja je avtomatizirano in zagotavlja natančno izvedbo eksperimenta brez potrebe po ročnem posredovanju.

8.2.1.3 *Beleženje podatkov in generacija CSV*

Sistem samodejno beleži vse pridobljene podatke, vključno s položajem detektorja, povprečno temperaturo in CPS na posamezni točki. Podatki se shranjujejo v strukturirano datoteko CSV z imenom, ki vsebuje datum in čas začetka eksperimenta. Datoteka CSV omogoča enostavno analizo in vizualizacijo rezultatov ter ponovljivost eksperimenta.

8.2.2 Način 1: Čas merjenja

Način 1 je poenostavljen način delovanja, ki omogoča izvajanje eksperimenta za določeno časovno obdobje na določeni točki.

8.2.2.1 *Nastavitev položaja, temperature in časa*

Uporabnik nastavi:

- položaj detektorja: lokacija na vodilu, kjer se bo izvajala meritev;
- temperaturo: zelena temperatura, ki jo sistem vzdržuje;
- čas: trajanje merjenja v sekundah.

Te nastavitve omogočajo prilagodljivost glede na specifične zahteve eksperimenta.

8.2.2.2 *Postopek merjenja in prikaz rezultatov*

Sistem premakne detektor na nastavljen položaj in počaka, da temperatura doseže ciljno vrednost. Nato začne merjenje za določen časovni interval. Po izteku časa GUI prikaže rezultate merjenja, vključno s povprečnim CPS in drugimi ključnimi podatki. Rezultati so prikazani v oknu z možnostjo shranjevanja ali nadaljevanja eksperimenta.

8.2.3 Način 2: Čas do 10.000 dogodkov

Način 2 je specifično zasnovan za merjenje časa, potrebnega za doseg 10.000 nevtronskih dogodkov.

8.2.3.1 *Nastavitev položaja in temperature*

Uporabnik nastavi:

- položaj detektorja: lokacija na vodilu za izvajanje merjenja;
- temperaturo: želena temperatura, ki jo sistem vzdržuje.

Te nastavitve omogočajo natančno pripravo eksperimenta za določeno točko.

8.2.3.2 *Postopek merjenja in prikaz rezultatov*

Sistem premakne detektor na določeno lokacijo in počaka, da temperatura doseže ciljno vrednost. Nato sistem začne merjenje in sproti beleži število nevtronskih dogodkov. Ko se doseže 10.000 dogodkov, GUI prikaže čas, ki je bil potreben za to, in omogoči shranjevanje rezultatov.

9 EKSPERIMENTALNA DOLOČITEV DIFUZIJSKE DOLŽINE NEVTRONOV

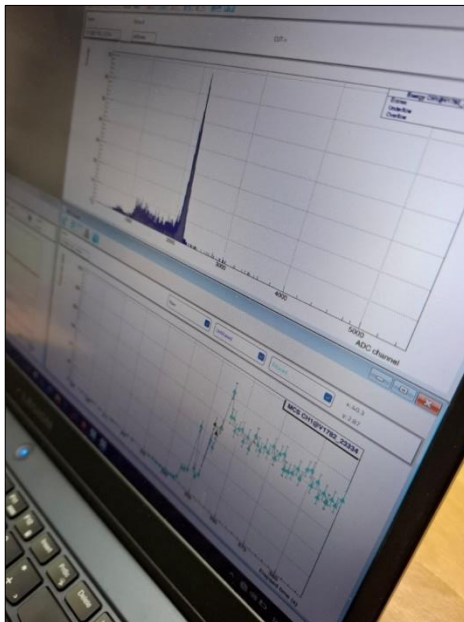
V tem poglavju je obravnavan eksperimentalni pristop k določanju difuzijske dolžine nevtronov (L) z meritvami števila zaznanih pulzov (ciljno število nevtronskih sunkov) v odvisnosti od razdalje nevtronskega vira. Predstavljeni so uporabljeni fizikalni modeli, matematično ozadje, opis eksperimentalnega postopka, podrobnosti o obdelavi podatkov in razlaga rezultatov.

9.1 Uvod v nevtronsko difuzijo in pomen difuzijske dolžine

Nevtronska difuzija opisuje, kako se nevtroni širijo v snovi zaradi naključnih razpršitev in pri tem počasi izgubljajo energijo ali pa se absorbirajo. Ključen parameter pri kvantitativnem

opisovanju tega pojava je difuzijska dolžina L . Difuzijska dolžina pove, kako daleč povprečno nevtroni potujejo, preden se v povprečju iz sistema »izgubijo« (zaradi absorpcije ali uhajanja) (slika 13).

Slika 13: Spekter signala detektorja He-3, posnet z uporabo večkanalnega analizatorja – VKA (angl. Multi-Channel Analyzer – MCA)



Vir: Inštitut Jožefa Stefan F8, december 2024.

V jedrski tehniki se L pogosto uporablja za napovedovanje profila nevtronskega toka v reaktorskih območjih, kjer nimamo virov ali močne absorpcije blizu stene ali robov. Natančno poznavanje difuzijske dolžine je pomembno za:

- varno obratovanje reaktorjev: pravilna napoved razporeditve nevtronskega toka;
- načrtovanje ščitov: določanje ustrezne debeline materiala za zmanjšanje nevtronskega sevanja;
- zanesljivo simulacijo jedrskih procesov: validacija računalniških orodij, ki temeljijo na difuzijski teoriji.

9.2 Teoretična osnova in matematični model

To podpoglavje razloži teoretični model, ki opisuje, kako se število nevtronov zmanjšuje z oddaljenostjo od vira, ko potujejo skozi material, kot je voda. Ključni parameter pri tem je difuzijska dolžina, ki pove, kako daleč nevtroni v povprečju pridejo. Model poveže teoretično zmanjševanje števila nevtronov s številom signalov, ki jih izmeri detektor. Predstavljena je matematična metoda, s katero se izmerjene podatke (števila signalov in razdalje) predela tako, da se lahko na grafu prikažejo kot ravna črta. Iz strmine te črte se nato

izračuna eksperimentalna vrednost difuzijske dolžine. Omeni se tudi primerjava dobljenega rezultata s standardnimi vrednostmi iz literature.

9.2.1 Nevtronski tok in eksponentni upad

V poenostavljeni difuzijski teoriji, kjer obravnavamo točkasti nevtronski vir v homogeni in izotropni sredici, velja aproksimacija:

$$\phi(r) \propto (1/r) \cdot \exp(-r/L) \dots \dots \dots (9.1)$$

Količina $\phi(r)$ predstavlja nevtronski tok oz. število nevtronov, ki v danem trenutku prečka enoto ploskve na razdalji r od vira. Faktor $1/r$ odseva geometrijsko razpršenost nevtronov, medtem ko je $\exp(-r/L)$ posledica absorpcij in sipanj, ki vodijo do postopne difuzije nevtronov iz danega območja.

9.2.2 Povezava s hitrostjo štetja (frekvenca pulzov)

V eksperimentu pogosto ne merimo neposredno nevtronskega toka $\phi(r)$, ampak število zaznanih pulzov na sekundo CPS(r). Če predpostavimo, da je detektor v linearnem območju delovanja (brez nasičenja) in da je CPS(r) sorazmerno z $\phi(r)$, velja:

$$\text{CPS}(r) \propto (1/r) \cdot \exp(-r/L) \dots \dots \dots (9.2)$$

9.2.3 Linearna transformacija in določanje L

Želimo, da se to razmerje prikaže kot linearna funkcija, kar dosežemo z ustrezno matematično obdelavo. Najprej pomnožimo CPS(r) z r in nato vzamemo naravni logaritem:

$$\text{CPS}(r) \cdot r \propto \exp(-r/L) \dots \dots \dots (9.3)$$

Z logaritmiranjem dobimo:

$$\ln[\text{CPS}(r) \cdot r] = \ln(K) - r/L \dots \dots \dots (9.4)$$

kjer je $\ln(K)$ (oziroma K) konstanten faktor, ki zajema moči nevtronskega vira, detektorsko učinkovitost ipd. Po tej transformaciji velja:

$$y = \ln[\text{CPS}(r) \cdot r], \quad x = r \dots \dots \dots (9.5)$$

Z linearnim modelom:

$$y = \ln(K) - (1/L) \cdot x \dots \dots \dots (9.6)$$

Če s pomočjo linearne regresije določimo naklon (slope) in prestrez (angl. intercept), je $\text{slope} = -1/L$, zato lahko izračunamo:

$$L = -1 / \text{slope}, \quad K = e^{(\text{intercept})} \dots\dots\dots(9.7)$$

9.2.4 Primerjava eksperimentalnih podatkov z referenčnimi vrednostmi

V literaturi je za določene snovi pogosto navedeno, da znaša $1/L$ približno $0,12 \text{ cm}^{-1}$. Ta vrednost je eksperimentalni standard, s katerim preverimo skladnost eksperimentalno izračunanih rezultatov.

9.3 Grafična interpretacija razdalje in CPS

To podpoglavje opisuje, kako se grafično interpretirajo razmerja med izmerjeno razdaljo detektorja od vira in številom štetij (CPS). Predstavi ključno merilno opremo (detektor, sistem za pozicioniranje) in postopek merjenja CPS na različnih diskretnih razdaljah. Posebej pomembna je razložena kalibracijska transformacija izmerjene razdalje (angl. Distance) v fizikalno relevantno razdaljo (r), ki upošteva geometrijske omejitve postavitve in uporablja specifične konstante. Ta kalibrirana razdalja r in podatki CPS so nato osnova za nadaljnjo obdelavo in analizo.

9.3.1 Merilna oprema

- Detektor nevtronov: Detektor beleži število zaznanih nevtronov v enoti časa (CPS). Ključna predpostavka je, da je v merilnem območju detektor linearno odziven.
- Nosilec in koordinatni sistem: Poskrbeti je treba za natančno določanje razdalje Distance (cm) med virom in detektorjem.

9.3.2 Postopek merjenja

- Postavitev detektorja na željeno začetno razdaljo od nevtronskega vira.
- Meritev nevtronskega signala: Zabeležimo število pulzov v določenem časovnem oknu (ali neposredno CPS).
- Spreminjanje razdalje: Premaknemo detektor za majhen korak, ponovno izmerimo CPS.
- Ponavljanje: Ta postopek ponavljamo pri več točkah (npr. 40–80 različnih razdaljah), da dobimo dovolj podatkov za zanesljivo linearnost v $\ln(\text{CPS} \cdot r)$ vs. r .

9.3.3 Kalibracija razdalje

V naši analizi smo (zaradi specifične eksperimentalne postavitve) uvedli še dodatno linearno transformacijo:

$$r = a \cdot \text{Distance (cm)} + b \dots\dots\dots(9.8)$$

kjer sta $a = 0,8191$ in $b = 15,011$ kalibracijska koeficienta, določena za prilagoditev eksperimentalne geometrije. S tem skušamo popraviti sistematične napake, saj se vodilo za detektor ne more približati viru bližje od 15,011 cm. Tako izenačimo pri merjenju Distance (cm).

9.4 Obdelava podatkov

Za analizo smo pripravili skripto Python, ki samodejno:

- uvozi podatke iz datoteke CSV,
- odstrani neveljavne vnose (npr. Distance ≤ 0 , CPS Rate ≤ 0 , NaN),
- uporabi kalibracijo:

$$r_i = 0.8191 \cdot \text{Distance}_i + 15.011 \dots\dots\dots(9.9)$$

- izračuna $y_i = \ln[\text{CPS}_i \cdot r_i]$,
- izpiše izračunane vrednosti L, K in primerjavo z literaturno vrednostjo 1/L,
- naredi grafe:
 - r vs. CPS(r) za vizualno predstavitev splošnega trenda,
 - r vs. $\ln[\text{CPS}(r) \cdot r]$ za preverjanje linearnosti.

9.5 Rezultati in analiza

Po uvozu podatkov in uspešno izvedeni linearni regresiji dobimo v izpisu (in na grafih) naslednje ključne vrednosti:

- difuzijsko dolžino (L), izračunano kot $-1/\text{slope}$;
- konstanto (K) $K = \text{eintercept}$, ki združuje detektorsko učinkovitost in moč izvora;
- primerjavo 1/L, izračunano 1/L primerjamo z referenčno vrednostjo, tu nastavljeno na $0,12 \text{ cm}^{-1}$. Ocenimo razliko (angl. Calculated-Reference) in s tem opredelimo morebitno odstopanje.

9.5.1 Grafični prikaz

Graf razdalja vs. CPS, prikaže, da se intenziteta nevtronskega sevanja (CPS) praviloma zmanjšuje z naraščajočo razdaljo.

Graf $\ln(\text{CPS} \cdot r)$ vs. r : Če je difuzijska teorija primerna in meritev ustrezno izvedena, so točke približno urejene na ravni črti. Koeficient naklona te črte (oz. polinomska stopnja ≈ 1) neposredno povezuje eksponentno popuščanje z difuzijsko dolžino.

9.5.2 Izračun statistične negotovosti:

Ker zaznavanje nevtronov temelji na štetju diskretnih dogodkov (CPS – štetje na sekundo), velja Poissonova statistika. Statistična negotovost pri štetju dogodkov NN je dana z izrazom:

$$\sigma_N = \sqrt{N} \dots\dots\dots (9.10)$$

Relativna napaka pa je:

$$\sigma_N / N = 1 / \sqrt{N} \dots\dots\dots (9.11)$$

Ta napaka odraža naravno fluktuacijo zaradi naključnega procesa zaznavanja. Pri nizkih vrednostih CPS je relativna napaka večja, zato so meritve manj natančne in bolj podvržene šumu. Analiza takšnih statističnih in sistematičnih negotovosti je ključna za pravilno interpretacijo rezultatov (Chakraverty & Nayak, 2017).

9.5.3 Možni viri napak in odstopanj

- Statistični šum: Pri nizkih meritvah CPS so lahko statistične negotovosti relativno visoke.
- Neidealna točkovnost vira: Če vir ni idealno točkoven, se lahko pojavijo popačitve pri večjih razdaljah.
- Kalibracija razdalje: Sistematična napaka pri Distance (cm) vodi do napačnega r in s tem do odstopanja pri naklonu.
- Detektorska učinkovitost: Različna energija nevtronov ali drugi instrumentalni učinki lahko povzročijo manj idealno sorazmerje med CPS in $\phi(r)$.

9.6 Sklepne ugotovitve

V tem poglavju smo prikazali, kako na podlagi izmerjene stopnje detekcije nevtronov (CPS) in razdalje do nevtronskega vira določimo difuzijsko dolžino L .

Ključni koraki zajemajo (Duderstadt & Hamilton, 1976):

- pripravo in filtracijo podatkov: izločitev neustreznih točk, kalibracija razdalje,
- linearizacijo: $\ln[\text{CPS}(r) \cdot r]$,
- linearno regresijo: določitev koeficienta naklona (slope) in prestrežka (intercept),

- izračun in interpretacijo: iz slope pridobimo L , iz intercept dobimo konstantni faktor K ,
- vrednotenje rezultatov: primerjava $1/L$ z literaturno vrednostjo $0,12 \text{ cm}^{-1}$ (pri temperaturi $20 \text{ }^\circ\text{C}$).

Pokazalo se je, da se z razmeroma enostavnim eksperimentalnim postopkom in primerno analizo podatkov rezultati ujamejo z osnovno difuzijsko teorijo. Odstopanja, če so razmeroma majhna, običajno pripišemo eksperimentalnim neidealnostim, statističnim napakam ali specifičnosti detektorja in vira.

S tem je potrjeno, da je metoda $\ln[\text{CPS} \cdot r]$ v odvisnosti od r učinkovita za določanje difuzijskih parametrov ter da je teoretično izpeljana linearna odvisnost pri logaritemski transformaciji tudi dejansko potrjena v praksi.

10 PRIMERJAVA EKSPERIMENTALNIH REZULTATOV PRI RAZLIČNIH TEMPERATURAH

V tem poglavju predstavljamo izsledke petih zaporednih meritev, pri katerih je bil isti postopek (merjenje CPS v odvisnosti od razdalje) izveden pri različnih ciljnih temperaturah. V vsaki izmed meritev smo na podlagi zbranih podatkov in linearne regresije določili difuzijsko dolžino nevtronov (L) in izračunali $1/L$. Cilj poglavja je ovrednotiti, ali in kako se vrednost L spreminja pri spreminjanju temperature.

10.1 Vir nevtronov

Nevtronski vir Am-Be temelji na interakciji med izotopom americija (^{241}Am) in berilijem (Be). ^{241}Am je alfa-sevalni izotop z razpolovno dobo približno 432 let, ki oddaja delce alfa visoke energije. Ko ti delci trčijo z jedri berilija, sprožijo jedrsko reakcijo, pri kateri nastanejo ogljikovi izotopi (^{12}C) in nevtroni (n). Sproščeni nevtroni imajo širok energijski spekter, običajno v območju od 1 do 10 MeV, kar jih naredi primerne za različne znanstvene in industrijske aplikacije. Ta fizikalni proces omogoča zanesljivo produkcijo nevtronov skozi daljše časovno obdobje. Nevtronski viri Am-Be so znani po svoji kompaktnosti, dolgotrajni stabilnosti in enostavni uporabi. Njihova zaprta konstrukcija zagotavlja minimalno tveganje za uhajanje radioaktivnih snovi, če so pravilno skladiščeni in uporabljeni. Zaradi širokega energijskega spektra nevtronov so še posebej uporabni za kalibracijo nevtronskih detektorjev, kot so detektorji He-3 (^3He), ki se pogosto uporabljajo za merjenje nevtronske difuzije. Stabilnost in zanesljivost virov Am-Be omogočata njihovo uporabo v dolgoročnih eksperimentalnih postavitvah brez opaznega zmanjšanja intenzitete nevtronskega toka, kar je ključnega pomena za natančne meritve in analize (slika 14).

Slika 14: Vir nevtronov Am-Be



Vir: Julijan Peric, december 2024.

10.2 Pregled izvedenih meritev

Za eksperimente smo izvedli pet ločenih meritev (označimo jih kot *test 1* do *test 4*). Po vrsti so potekale v razponu dni 19. 12. 2024 in 10. 1. 2025. Pri vsakem preizkusu je bila nastavljena ciljna temperatura (angl. Target Temperature), koraki (angl. steps per measurement (cm)) in ciljno izhodišče CPS. V tabeli 1 so zbrane osnovne informacije iz vseh petih izvedenih meritev (Test 1 do Test 4), vključno z datumom in časom, ciljno temperaturo, velikostjo koraka, ciljno vrednostjo CPS, številom točk ter izmerjenima vrednostma L in $1/L$. V dodatku so prikazani podatki posameznih merskih točk, ki so bili uporabljeni za določitev difuzijske dolžine L .

Meritve so bile izvedene pri različnih temperaturah in z enakomernimi koraki po 0,5 cm. CPS (število pulzov na sekundo) vrednosti so bile nato prikazane na logaritmični skali kot funkcija razdalje. Za določitev L smo uporabili eksponentno prilagoditev podatkov z enačbo:

$$N(x) = N_0 \cdot e^{(-x / L)} \dots\dots\dots (10.1)$$

kar v logaritemski obliki postane:

$$N(x) = \ln(N_0) - x / L \dots\dots\dots (10.2)$$

S tem smo s pomočjo linearne regresije $\ln(\text{CPS})$ odvisnosti od razdalje x določili naklon premice, iz katere je bila izračunana dolžina L . Vrednost L je enaka negativnemu reciproku naklona, torej:

$$L = -1 / k \dots\dots\dots (10.3)$$

Tabela 1: Osnovne informacije iz vseh petih izvedenih meritev

Test	Datum	Temp (°C)	Koraki (cm)	CPS na sekundo	Število meritev	L (cm)	1/L (cm ⁻¹)
1	19. 12. 2024	20	0,5	10.000	110	8,6199 ± 0,15	0,1160
2	20. 12. 2024	25	0,5	10.000	61	8,0146 ± 0,15	0,1248
3	20. 12. 2024	35	0,5	10.000	55	7,9497 ± 0,15	0,1258
4	20. 12. 2024	45	0,5	10.000	48	7,9798 ± 0,15	0,1253

Vir: lasten.

10.3 Analiza in primerjava vrednosti difuzijske dolžine

V vseh primerih je bila tarča meritev enaka: določiti nevtronsko difuzijsko dolžino (L) s pomočjo funkcije $\ln[\text{CPS}(r) \cdot r]$ v odvisnosti od razdalje (r). Na podlagi petih testov smo pridobili rezultate L in 1/L (tabela 2).

Tabela 2: Rezultati L in 1/L

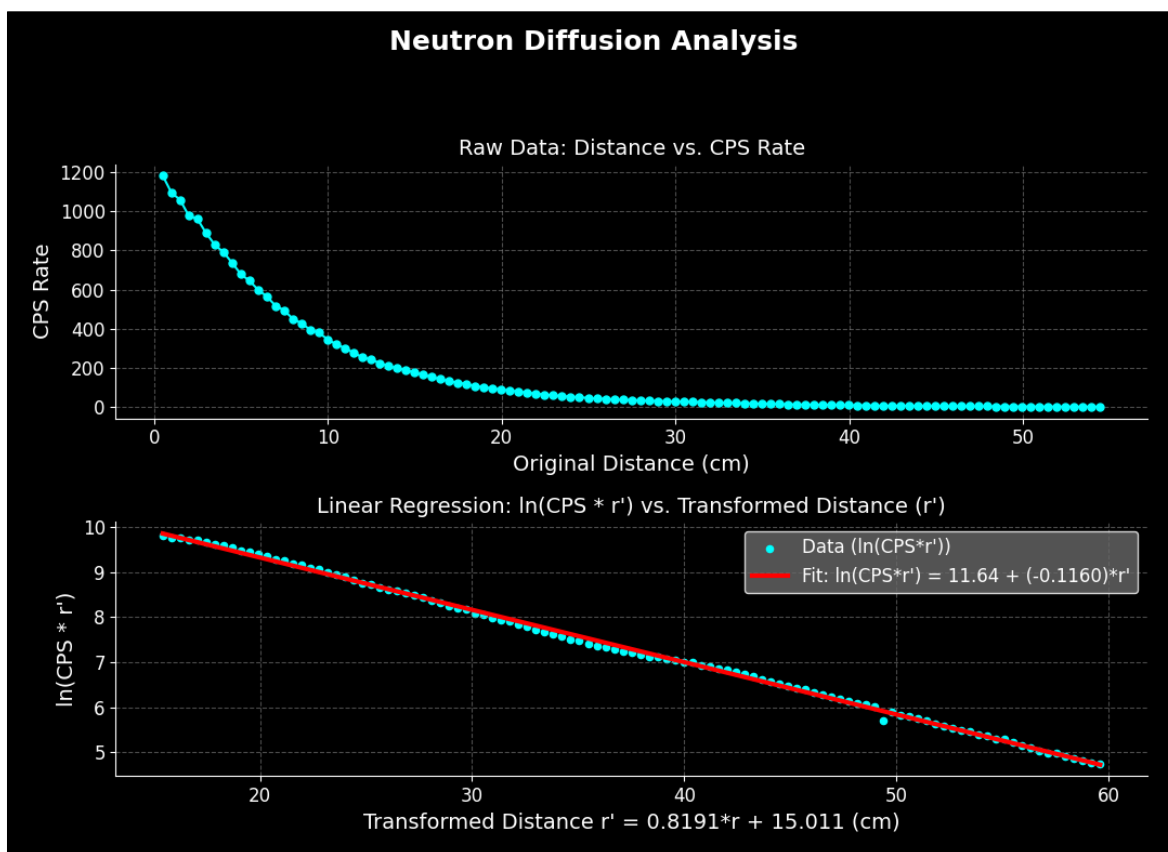
Test	Temp (°C)	L (cm)	1/L (cm ⁻¹)
1	19	8,6199	0,1160
2	25	8,0146	0,1248
3	35	7,9497	0,1258
4	45	7,9798	0,1253

Vir: lasten.

10.4 Test pri 20 °C

Pri temperaturi 20 °C so bili pridobljeni eksperimentalni podatki, ki kažejo, da je dolžina difuzije (L) znašala 8,6199 cm. Ta vrednost ustreza teoretičnim predpostavkam o nevtronski difuziji in absorpciji v materialih. Koeficient absorpcije nevtronov (Σ_a) je bil določen na 0,1160 cm⁻¹, kar odraža značilnosti interakcije nevtronov z medijem pri tej temperaturi. Izračunano razmerje 1/L je bilo 0,1160 cm⁻¹ in se dobro ujema z literaturno vrednostjo 1/L (Duderstadt & Hamilton, 1976), ki znaša 0,120 cm⁻¹. Razlika med eksperimentalno in literaturno vrednostjo je znašala -0,0040 cm⁻¹, kar potrjuje natančnost izvedenih meritev (slika 15).

Slika 15: Graf difuzije nevtronov in linearna transformacija pri 20 °C

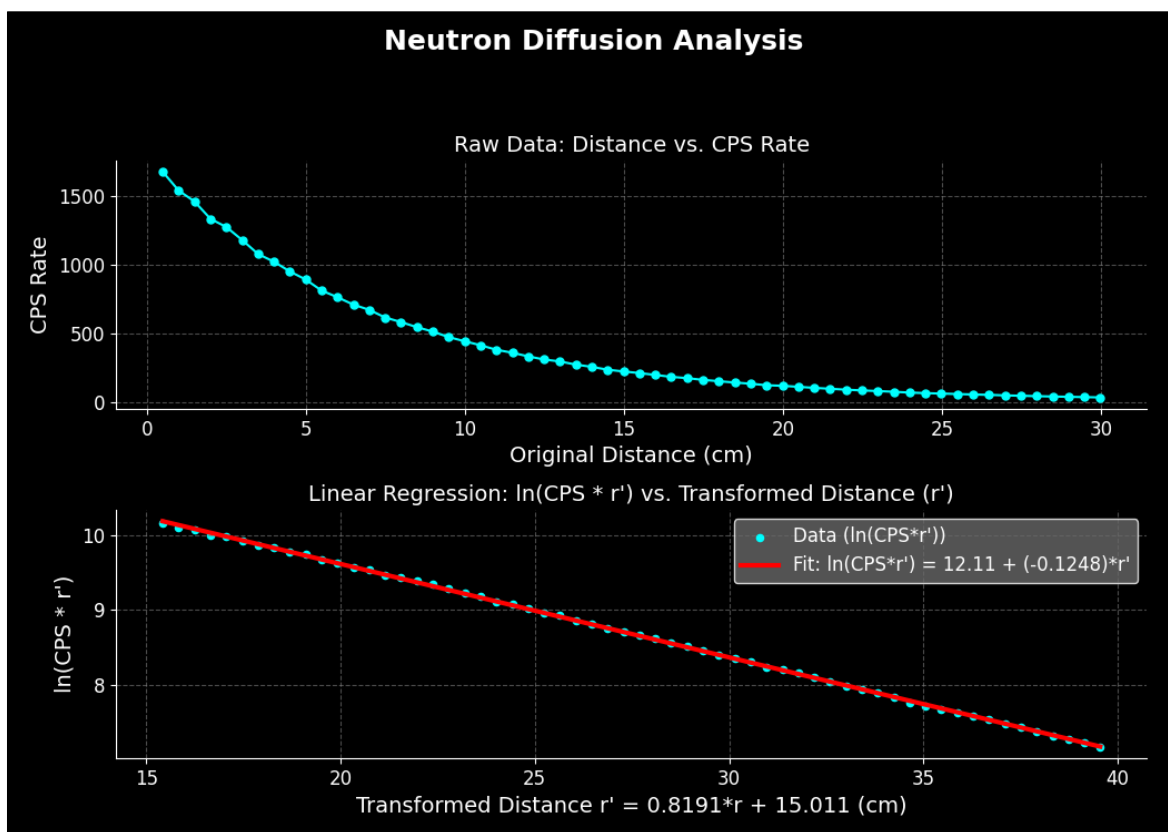


Vir: Inštitut Jožefa Stefan F8, december 2024.

10.5 Test pri 25 °C

Eksperimentalni rezultati so pokazali dolžino difuzije (L), ki je bila izračunana kot 8,01 cm, medtem ko je koeficient absorpcije nevtronov (Σ_a) znašal $0,1248 \text{ cm}^{-1}$. Na podlagi zveze $L = -1/\text{slope}$ in dobljenega naklona slope, ki je pri 25 °C znašal približno $-0,1248 \text{ cm}^{-1}$, smo določili difuzijsko dolžino $L \approx 8.01 \text{ cm}$. Razmerje $1/L$ je bilo določeno kot $0,1248 \text{ cm}^{-1}$, kar je bilo primerjano z vrednostjo iz literature (Duderstadt & Hamilton, 1976) $1/L$, ki znaša $0,120 \text{ cm}^{-1}$. Razlika med eksperimentalno izračunano vrednostjo in literaturno vrednostjo je znašala $-0,0048 \text{ cm}^{-1}$. Meritve so bile izvedene pri temperaturi 25 °C (slika 16).

Slika 16: Graf difuzije nevtronov in linearna transformacija pri 25 °C

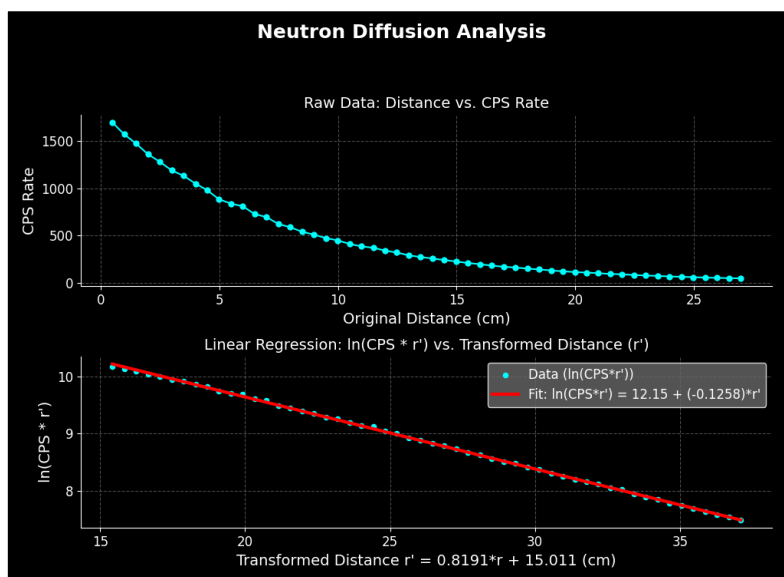


Vir: Inštitut Jožefa Stefan F8, december 2024.

10.6 Test pri 35 °C

Eksperimentalni podatki pri temperaturi 35 °C so pokazali, da je izračunana dolžina difuzije nevtronov znašala 7,9497 cm. Ta vrednost ponazarja značilnosti difuzije nevtronov pri višji temperaturi. Izračunana vrednost koeficienta absorpcije nevtronov (Σ_a) je bila 0,1258 cm⁻¹, kar je v skladu z eksponentnim upadom hitrosti štetja nevtronov z razdaljo. Razmerje $1/L$, določeno na podlagi eksperimentalnih podatkov, je bilo 0,1258 cm⁻¹. Primerjava z literaturno vrednostjo $1/L$, ki znaša 0,120 cm⁻¹, je razkrila razliko -0,0058 cm⁻¹, kar potrjuje dobro skladnost eksperimentalnih in teoretičnih rezultatov (slika 17).

Slika 17: Graf difuzije nevtronov in linearna transformacija pri 35 °C

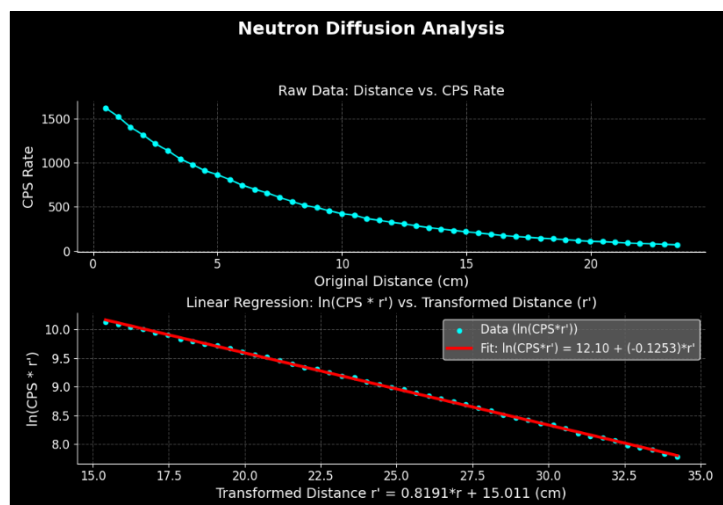


Vir: Inštitut Jožefa Stefan F8, december 2024.

10.7 Test pri 45 °C

Pri temperaturi 45 °C so bili določeni ključni eksperimentalni podatki, ki so pokazali, da je dolžina difuzije (L) znašala 7,9798 cm. Koeficient absorpcije nevtronov (Σ_a), izračunan iz eksperimentalnih podatkov, je bil enak $0,1253 \text{ cm}^{-1}$, kar je skladno z opazovanji upada hitrosti štetja nevtronov v odvisnosti od razdalje. Izračunano razmerje $1/L$ je znašalo $0,1253 \text{ cm}^{-1}$ in je bilo primerjano z literaturno vrednostjo, ki znaša $0,120 \text{ cm}^{-1}$. Ugotovljena razlika med eksperimentalno in literaturno vrednostjo je znašala $-0,0053 \text{ cm}^{-1}$ (slika 18).

Slika 18: Graf difuzije nevtronov in linearna transformacija pri 45 °C



Vir: Inštitut Jožefa Stefan F8, december 2024.

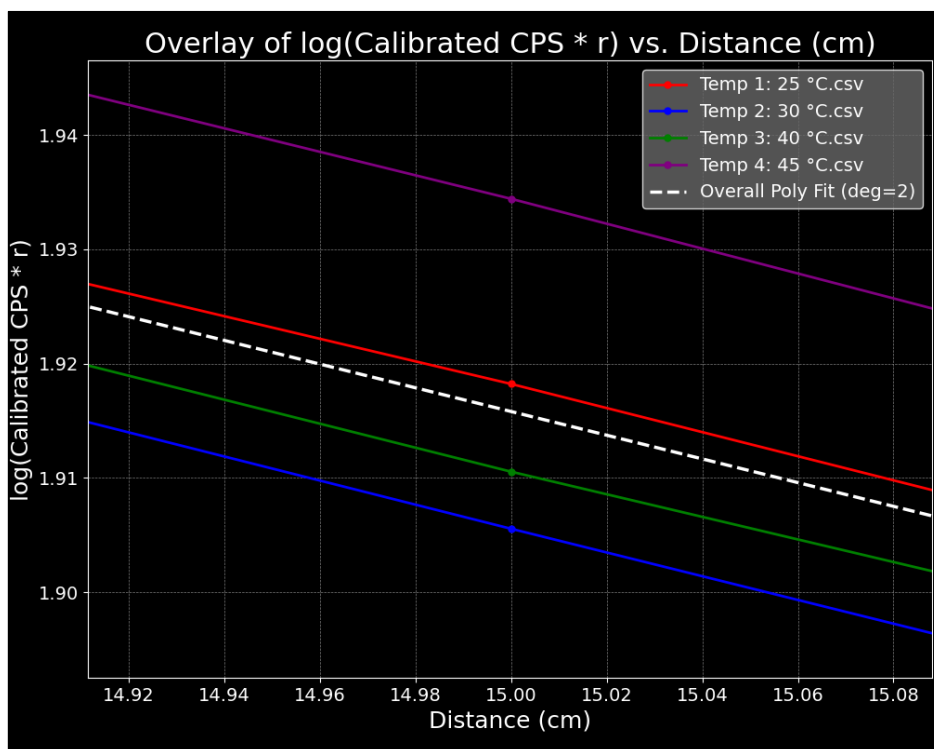
10.8 Primerjava rezultatov različnih temperatur

Na grafu na sliki 19 so prikazane štiri premice, vsaka ustrezna različni temperaturi merjenja: 25 °C (rdeča krivulja), 30 °C (modra), 40 °C (zelena) in 45 °C (vijolična). Na vodoravni osi je prikazana razdalja (v centimetrih), na navpični pa vrednost logaritmsko obdelanih podatkov $\ln(\text{CPS} \times r)$. Namen takšnega prikaza je preveriti, kako se pri različnih temperaturah spreminja difuzijska (oziroma oslabitvena) lastnost nevtronov, ki jo v idealnem primeru opisuje linearna zveza z negativnim naklonom.

10.8.1 Razporeditev krivulj in nakloni

- Rdeča krivulja (25 °C) se nahaja najnižje od vseh, kar pomeni, da ima nekoliko bolj negativen naklon kot ostale. To nakazuje, da je pri 25 °C koeficient $-1/L$ (oz. kombinacija učinkov difuzije in geometrije) nekoliko večji kot pri višjih temperaturah.
- Modra krivulja (30 °C) in zelena krivulja (40 °C) sta si med seboj precej blizu, kar namiguje na soroden naklon, torej relativno podobno izmerjeno vrednost $1/L$.
- Vijolična krivulja (45 °C) poteka najvišje od prikazanih, kar nakazuje na najmanjši naklon po absolutni vrednosti. Posledično ima vzorec pri 45 °C najnižjo vrednost $1/L$ med vsemi štirimi testiranimi temperaturami.

Slika 19: Primerjava nevtronskih dolžin pri različnih temperaturah (povečana)



Vir: Inštitut Jožefa Stefan F8, december 2024.

10.8.2 Razlike v prestrezniku (interceptu)

Čeprav je večji poudarek na naklonu, so med krivuljami opazne tudi manjše razlike v vertikalnem zamiku (t. i. intercept). Te razlike lahko izvirajo iz:

- kalibracijskih faktorjev detektorja,
- sistematičnih razlik v začetnih pogojih (npr. začetna postavitev pri različnih eksperimentih),
- majhnih sprememb v geometriji (razdalja, usmerjenost detektorja).

10.8.3 Poudarki glede temperature

- 25 °C (rdeča): Najstrmejša premica pomeni, da se pri tej temperaturi $\ln(\text{CPS} \times r)$ zmanjšuje najhitreje z razdaljo, kar sovпада z nižjo difuzijsko dolžino (oz. višjim $1/L$).
- 30 °C in 40 °C (modra, zelena): Zelo podobna naklona kažeta, da se pri teh dveh temperaturah difuzijske lastnosti le malo razlikujejo oziroma so izmerjene vrednosti $1/L$ skoraj enake.
- 45 °C (vijolična): Najmanj negativen naklon med vsemi pomeni nekoliko višjo difuzijsko dolžino. Ta temperatura bi torej (po izmerjenih podatkih) imela najbolj 'blago' difuzijo nevtronskega toka na enoto razdalje.

Slika 20: Primerjava nevtronskih difuzijskih dolžin pri različnih temperaturah



Vir: Inštitut Jožefa Stefan F8, december 2024.

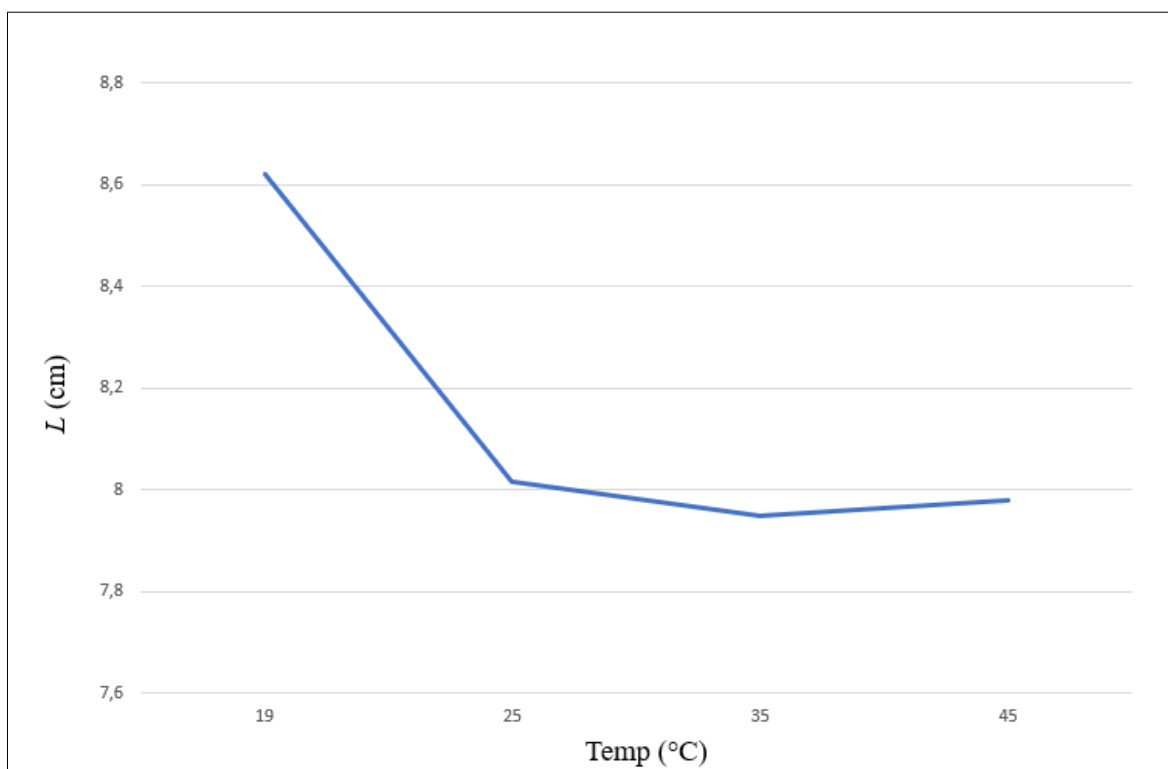
Graf na sliki 20 jasno pokaže, da pri višjih temperaturah (predvsem 45 °C) opazimo manj strm padec $\ln(\text{CPS} \times r)$, kar pomeni nižjo vrednost $1/L$ in posledično daljšo difuzijsko dolžino. Vsaka krivulja je sicer zelo dobro približana z ravno črto, kar kaže, da zakonitost $\ln(\text{CPS} \times r) \approx -rL$ velja v vseh prikazanih primerih.

10.9 Trendi

Vrednosti L (slika 21):

- V testu 1 (19 °C) je $L \approx 8,3650$ cm. Z dvigom temperature (testi 2, 3, 4) se L rahlo zmanjša (na približno 7,95–8,01 cm).

Slika 21: Graf L (cm)

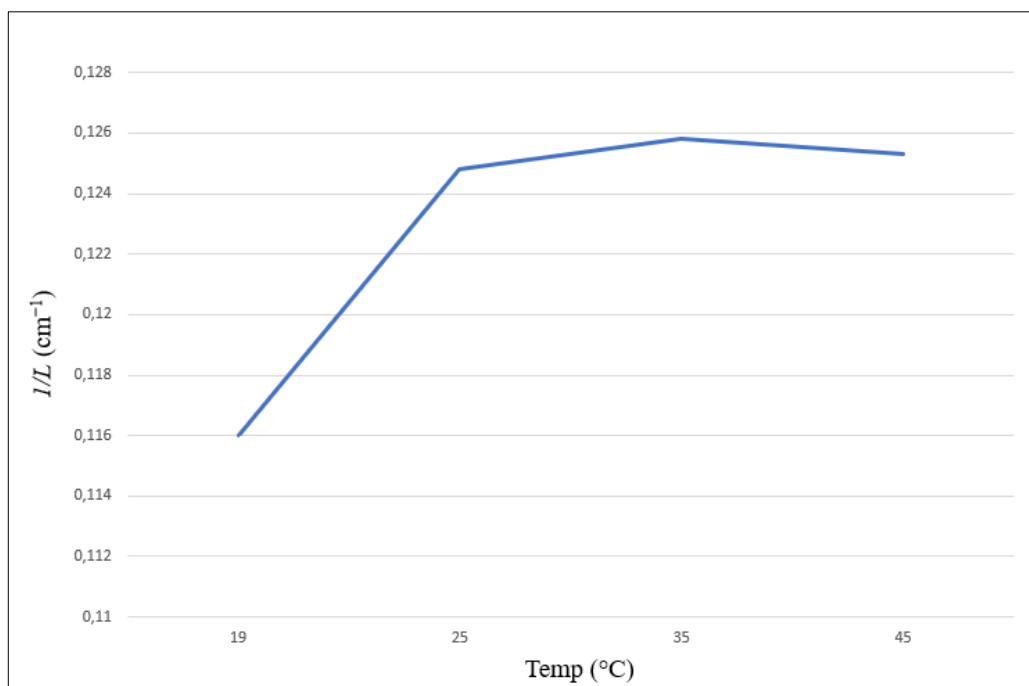


Vir: Inštitut Jožefa Stefan F8, december 2024.

- Med 35 °C in 45 °C se vrednosti L gibljejo v ozkem območju, razlike so znotraj reda stotink centimetra, kar nakazuje le rahlo temperaturno odvisnost. Te so lahko posledica zunanjih virov.

Vrednosti $1/L$ (slika 22):

- Pri višjih temperaturah (25 °C, 35 °C, 45 °C) je $-1/L$ rahlo višji (okoli 0,1248–0,1258 cm^{-1}) kot pri najnižji (19 °C), kjer se vrednost giblje okoli 0,119 cm^{-1} .

Slika 22: Graf 1/L (cm^{-1})

Vir: *Inštitut Jožefa Stefan F8, december 2024.*

- Tretji (35 °C) in četrti test (45 °C) kažeta skoraj enaki vrednosti $-1/L$ (0,1258 cm^{-1} vs. 0,1253 cm^{-1}), kar priča o minimalnih razlikah v tem temperaturnem območju.

10.10 Možni vzroki razlik

- Temperaturna odvisnost materiala: Sprememba temperature vpliva na gostoto in s tem tudi na razpršilne lastnosti vode (oziroma moderatorja), zaradi česar se lahko difuzijski parametri spremenijo.
- Napake pri merjenju: Kljub ustrezni kalibraciji pride do sistematičnih odstopanj (npr. netočna razdalja med detektorjem in izvorom) ali do nepopolne diskriminacije nevtronov pri štetju (CPS).
- Statistični šum: Manjše število meritev (npr. 48 ali 55 točk) je lahko nekoliko bolj podvrženo večjim fluktuacijam kot test z 78 merilnimi točkami.

10.11 Primerjava z referenčnimi vrednostmi in ugotovitve

Kot omenjeno v poglavju 9, se v literaturi navajajo tipične vrednosti $-1/L$ v območju 0,12–0,13 cm^{-1} . Večina izmerjenih vrednosti v teh petih testih pade ravno v ta razpon (0,119–0,126 cm^{-1}).

10.11.1 Skladnost z literaturo

Vse merjene vrednosti se nahajajo v ozkem območju znotraj teoretično pričakovanih mej; razlike nekaj tisočink cm^{-1} so običajne zaradi eksperimentalnih napak in statističnih odstopanj. Na osnovi štirih zaporednih meritev pri različnih temperaturah (19 °C, 25 °C, 35 °C, 45 °C) lahko povzamemo:

- Difuzijska dolžina L večinoma ostaja v območju 7,95–8,39 cm.
- Vrednosti $1/L$ so večinoma v območju 0,119–0,126 cm^{-1} , kar je v skladu z referenčnimi podatki ($\approx 0,12\text{--}0,13 \text{ cm}^{-1}$).

Podatki kažejo, da se difuzijska dolžina L z naraščanjem temperature od 20 °C najprej zmanjša (pri 25 °C in 35 °C), nato pa pri 45 °C ostane približno enaka kot pri 35 °C. Inverzna vrednost $1/L$ posledično najprej naraste, nato pa se ustali oziroma rahlo zniža. Ta opaženi trend ni povsem v skladu s preprostim teoretičnim pričakovanjem. Teoretično gledano, z naraščanjem temperature vode njena gostota pada. Nižja gostota pomeni manjšo verjetnost tako za sipanje kot za absorpcijo nevtronov na enoto dolžine poti. Ker je makroskopski absorpcijski presek (Σ_a) tisti, ki primarno določa difuzijsko dolžino (približno $L^2 \approx D/\Sigma_a$, kjer D označuje difuzijski koeficient), in ker se Σ_a z zmanjšanjem gostote zmanjšuje, bi pričakovali, da se bo difuzijska dolžina L z naraščanjem temperature rahlo povečevala. Posledično bi se morala vrednost $1/L$ z naraščanjem temperature rahlo zmanjševati. Ta trend potrjujejo tudi standardni učbeniki in tabele jedrskih podatkov, ki navajajo difuzijske parametre za vodo pri različnih temperaturah (Duderstadt & Hamilton, 1976; Lamarsh & Baratta, 2001). Na primer, Duderstadt in Hamilton (1976) in Lamarsh, J. R. & Baratta, A. J. (2001) prikazujejo podatke, iz katerih je razvidno to rahlo povečanje L (in zmanjšanje $1/L$) z naraščajočo temperaturo v območju od sobne temperature proti vrelišču. Možni razlogi za odstopanje opaženega trenda: Razlika med opaženim in pričakovanim trendom v tej nalogi je verjetno posledica kombinacije dejavnikov:

- Eksperimentalna negotovost: Merilne napake pri določanju razdalje, kalibraciji detektorja ali fluktuacije v moči vira lahko vplivajo na natančnost določitve naklona regresijske premice in s tem L .
- Statistične fluktuacije: Število merilnih točk pri vsaki temperaturi (med 48 in 110) in inherentna statistična narava štetja nevtronov lahko povzročita dovolj šuma, da zakrijejo sicer majhen pričakovan trend. Temperaturna odvisnost L v tem območju je namreč relativno šibka.
- Sistematske napake: Morebitne nekonsistentnosti v postavitvi med posameznimi meritvami pri različnih temperaturah.
- Zaključek o skladnosti: Kljub temu da opaženi temperaturni trend ni povsem skladen s teoretičnim pričakovanjem, so absolutne vrednosti $1/L$ (večinoma v območju 0,119–0,126 cm^{-1}) še vedno dobro znotraj območja, ki ga navaja literatura za sobne in rahlo povišane temperature (referenčno območje $\approx 0,12\text{--}0,13 \text{ cm}^{-1}$ (Duderstadt & Hamilton,

1976; Lamarsh, J. R. & Baratta, A. J. 2001), kar potrjuje splošno veljavnost eksperimentalne metode in rezultatov.

10.12 Možna nadgradnja meritev

- Razširitev temperaturnega področja: Izvesti dodatne teste pod 19 °C in nad 55 °C, da se preveri potencialna nelinearna odvisnost.
- Izboljšanje statistike: Pri vsaki točki zajeti več ponovitev ali podaljšati čas merjenja za zmanjševanja šuma.
- Primerjava različnih materialov: Če spreminjamo okolje (npr. dodajamo druge materiale – grafit, polietilen, tekoči dušik), lahko preverimo različne difuzijske dolžine.

Z analizo smo dobili vpogled v temperaturno odvisnost difuzijske dolžine v konkretnem eksperimentalnem sistemu. Rezultati nakazujejo, da je vpliv temperature prisoten, čeprav ne izstopa drastično in se še vedno giblje v okviru pričakovanih vrednosti za podobne sisteme.

11 VARNOSTNI VIDIKI

Varnost je ključni element eksperimentalne postavitve za difuzijo nevtronov v vodi, saj vključuje uporabo občutljivih komponent, visoko energijskih nevtronskih virov in kompleksne elektronske opreme. V tem poglavju so obravnavani ključni varnostni vidiki sistema.

11.1 Nadzor grelca in regulacija temperature

Nadzor temperature vode v posodi je ključnega pomena za zagotavljanje stabilnih eksperimentalnih pogojev. Sistem vključuje grelno enoto, ki je povezana z več temperaturnimi senzorji. Programirana regulacija temperature omogoča ohranjanje ciljne temperature z uporabo tolerančnega območja, kar preprečuje pregrevanje ali podhlajevanje sistema. Grelna enota je povezana s temperaturnimi senzorji prek serijskega protokola, kar zagotavlja zanesljivo komunikacijo in hitro odzivnost na temperaturne spremembe. Vgrajeni algoritmi nadzirajo delovanje grelca, pri čemer se grelec samodejno izklopi, če zazna nepravilnosti v sistemu, na primer hitro naraščanje temperature ali motnje v podatkih senzorja.

11.2 Mehanizmi zaustavitve v sili

Za zagotavljanje varnosti eksperimentalnega okolja je sistem opremljen z več mehanizmi za zaustavitev v sili. Ti vključujejo gumbе za nujno zaustavitev, ki so nameščeni na dostopnih mestih. Ob aktivaciji kateregakoli gumba se celoten sistem takoj zaustavi, kar prepreči

poškodbe komponent ali osebja. Programski nadzor spremlja stanje gumbov prek vhodov GPIO, pri čemer se ob zaznavi aktivacije izvedejo vsi potrebni koraki za varno zaustavitev sistema, vključno z izklopom grelca in motorja.

11.3 Delovanje končnih stikal in zaščita sistema

Končna stikala so nameščena na obeh koncih vodila detektorja ter zagotavljajo mehansko in programsko zaščito pred prekomernim gibanjem koračnega motorja. Ob zaznavi, da je detektor dosegel enega od končnih položajev, sistem samodejno ustavi motor in prepreči nadaljnje premike. To zmanjšuje tveganje za mehanske poškodbe vodila ali detektorja. Stanje končnih stikal se stalno spremlja, programska oprema pa vključuje algoritme za kalibracijo položaja, ki omogočajo pravilno določanje začetnega in končnega položaja detektorja.

SKLEP

V diplomski nalogi je bil razvit in implementiran avtomatiziran eksperimentalni sistem za proučevanje difuzije nevtronov v vodi. Cilj naloge je bil doseči natančno upravljanje eksperimenta, zajem podatkov ter njihovo analizo na varen in učinkovit način. Razvoj sistema je vključeval integracijo strojne opreme, kot so Raspberry Pi 5, FPGA Red Pitaya, detektor He-3, temperaturni senzorji in grelec, skupaj z implementacijo grafičnega uporabniškega vmesnika (GUI), ki omogoča nadzor vseh funkcij sistema. Eksperimentalni sistem je omogočil natančno določanje difuzijske dolžine nevtronov (L) z meritvami števila nevtronskih dogodkov (ciljno število nevtronskih sunkov) v odvisnosti od razdalje od nevtronskega vira pri različnih ciljnih temperaturah. Rezultati meritev so potrdili, da sistem omogoča stabilno in zanesljivo delovanje, saj so pridobljene vrednosti L skladne z literaturnimi vrednostmi, kar potrjuje natančnost eksperimenta in veljavnost uporabljenih metod. Poleg tehničnih dosežkov je bil v nalogi poseben poudarek na varnostnih vidikih sistema, vključno z implementacijo gumbov za nujno zaustavitev, končnih stikal, zaščitnih relejev in sistemov za regulacijo temperature. Ti mehanizmi zagotavljajo varno uporabo sistema ter preprečujejo poškodbe opreme in osebja. Zaključimo lahko, da je bil cilj naloge dosežen. Razvit sistem omogoča avtomatizirano izvajanje eksperimentov z minimalnim človeškim posredovanjem, stopnjo natančnosti in upravljanje prek GUI. Pri tem se izkazuje pomembnost kombinacije sodobnih tehnologij in metod za izboljšanje raziskovalnih postopkov v eksperimentalni fiziki. Za prihodnje delo predlagamo nadgradnjo eksperimenta z vključitvijo širšega temperaturnega spektra, povečanje števila merilnih točk in razširitev eksperimenta na druge moderacijske medije ter eksperimente z drugimi kapljevinami, kot je tekoči dušik. Naloga predstavlja trden temelj za nadaljnje raziskave in razvoj na področju detekcije nevtronov in analize njihovega obnašanja v različnih okoljih.

Avtorski prispevek: V okviru svojega avtorskega prispevka sem zasnoval, razvil in implementiral kompleksen avtomatiziran eksperimentalni sistem za proučevanje difuzije

neutronov v vodi. Moje delo je obsegalo celovito integracijo strojne opreme, vključno z Raspberry Pi 5, Red Pitayo, detektorjem He-3 in senzorji, ter razvoj namenske programske opreme z grafičnim uporabniškim vmesnikom (GUI) za enostavno upravljanje in avtomatizacijo meritev. Ključni del mojega prispevka je bila tudi implementacija robustnih varnostnih mehanizmov, kot so gumbi za zaustavitev v sili in zaščitni releji, ki zagotavljajo varno delovanje sistema. Poleg tehnične izvedbe sem uspešno vzpostavil sistem za zbiranje podatkov in izvedel analizo meritev, s katero sem potrdil skladnost pridobljenih rezultatov z literaturnimi vrednostmi, s čimer sem dokazal natančnost in zanesljivost celotne postavitve. S tem je ustvaril funkcionalno orodje, ki predstavlja pomembno nadgradnjo in trden temelj za nadaljnje raziskave na tem področju.

SEZNAM LITERATURE IN VIROV

- [1] Adam, A. & Bata, L. (1961). *Measurements of the diffusion length of thermal neutrons in water from 16 to 89°C and in diphyl (Dowtherm A) at 185°C*. Budapest: Communications of the Central Research Institute for Physics, Hungarian Academy of Sciences.
- [2] Chakraverty, S. & Nayak, S. (2017). *Neutron diffusion: concepts and uncertainty analysis for engineers and scientists*. Boca Raton: CRC Press.
- [3] Čižmek, S. (2023). *Določanje difuzijske dolžine nevtronov v vodi*: magistrsko delo. Ljubljana: Fakulteta za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani.
- [4] Duderstadt, J. J. & Hamilton, L. J. (1976). *Nuclear reactor analysis*. Phoenix: John Wiley & Sons.
- [5] Lamarsh, J. R. & Baratta, A. J. (2001). *Introduction to nuclear engineering* (3rd ed.). New Jersey: Prentice Hall.
- [6] Massachusetts Institute of Technology. (2025). *Helium-3 Neutron Proportional Counters*. Pridobljeno 13. aprila 2025 iz <https://web.mit.edu/8.13/www/JLExperiments/38/tgm-neutron-detectors.pdf>
- [7] Nuclear Power. (b.l.). *Diffusion Length*. Pridobljeno 29. decembra 2024 iz <https://www.nuclear-power.com/nuclear-power/reactor-physics/neutron-diffusion-theory/diffusion-length/>
- [8] Stacey, W. M. (2018). *Nuclear reactor physics* (3rd ed.). Weinheim: Wiley-VCH.
- [9] Inštitut Jožefa Stefan F8, december 2024
- [10] Julijan Peric, december 2024.
- [11] Global Nucleonics. (2011). *He3 Tubes*.
- [12] Critical Review of Scintillating Crystals for Neutron Detection, Kelum A.A. Gamage, Michal Cieslak, ResearchGate. (2019).