

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Rok Zupančič

**Senzorski sistem za analizo podatkov
v realnem času**

MAGISTRSKO DELO

ŠTUDIJSKI PROGRAM DRUGE STOPNJE
RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKA

MENTORICA: doc. dr. Mira Trebar

Ljubljana, 2018

AVTORSKE PRAVICE. Rezultati magistrskega dela so intelektualna lastnina avtorja in Fakultete za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani. Za objavlanje ali izkoriščanje rezultatov magistrskega dela je potrebno pisno soglasje avtorja, Fakultete za računalništvo in informatiko ter mentorja

©2018 ROK ZUPANČIČ

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem mentorici doc. dr. Miri Trebar za strokovno usmerjanje in pomoč pri izdelavi magistrskega dela. Zahvaljujem se tudi asistentu Aleksu Huču za vse nasvete in pomoč pri izvedbi ter analizi eksperimentov.

Iskrena hvala Tadeju Skuberju in doc. dr. Aleksandru Sešku za pomoč pri načrtovanju senzorskega sistema, ter Maji Dragutinović in prof. dr. Rajku Vidrihu za pomoč pri izvedbi eksperimentov. Hvala tudi družbi Istrabenz plini za dostavo tehničnih plinov.

Najlepše se zahvaljujem družini, dekletu in sošolcem, ki so mi ves čas stali ob strani, me podpirali in bili potrpežljivi.

Hvala!

Rok Zupančič, 2018

Kazalo

Povzetek

Abstract

1	Uvod	1
2	Pregled področja	5
2.1	Internet stvari	5
2.2	Hladna veriga	6
2.3	Doba uporabnosti	8
2.4	Plini v hladni verigi sadja in zelenjave	9
2.5	Senzorski sistemi	11
3	Senzorski sistem	15
3.1	Zahteve in funkcionalnosti	15
3.2	Strojna oprema	16
3.3	Implementacija SS-TH	21
3.4	Implementacija SS	22
3.5	Podatki	26
3.6	Spletna aplikacija	27
3.7	Delovanje sistema	34
4	Kalibracija in testiranje	39
4.1	Kalibracija	39
4.2	Delovanje senzorskega sistema v sobi	47

KAZALO

5	Eksperimenti	53
5.1	Hladna veriga in doba uporabnosti	53
5.2	Zorenje sadja in zelenjave	58
6	Sklepne ugotovitve	75

Seznam uporabljenih kratic

kratica	angleško	slovensko
A/D	Analog/Digital	Analogno/digitalni
API	Application programming interface	Vmesnik za programiranje
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research	Skupnost za znanstvene in industrijske raziskave
CSV	Comma-Separated Values	Vrednosti, ločene z vejico
GPS	Global Positioning System	Globalni sistem pozicioniranja
GSM	Global System for Mobile communications	Globalni sistem za mobilno komunikacijo
HTTP	Hypertext Transfer Protocol	Protokol za prenos hiperbesedilnih strani
IDE	Integrated development environment	Integrirano razvojno okolje
IoT	Internet of Things	Internet stvari
NFC	Near Field Communication	Komunikacija kratkega dosega
PCB	Printed circuit board	Tiskano vezje
ppm	parts per million	število delcev na milijon
RFID	Radio Frequency Identification	Radiofrekvenčna identifikacija

KAZALO

SL	Shelf Life	Doba uporabnosti
SS	Sensor system	Senzorski sistem
SS-TH	Sensor system - temperature and humidity	Senzorski sistem - temperatura in vlaga
USB	Universal Serial Bus	Univerzalno serijsko vodilo
UTC	Coordinated Universal Time	Univerzalni koordinirani čas
Wi-Fi	Wireless local area networking	Lokalno brezžično omrežje
WSN	Wireless Sensor Network	Brezžično senzorsko omrežje
W3C	World Wide Web	Internet stvari

Povzetek

Naslov: Senzorski sistem za analizo podatkov v realnem času

Vzdrževanje in nadzor ustreznih temperaturnih in drugih pogojev hladne verige za hitro pokvarljive proizvode je eno od pomembnih raziskovalnih področij, saj ob nepravilnem ravnanju zavržemo ogromne količine hrane. Z implementacijo “pametnih” senzorskih sistemov in algoritmov lahko pravočasno zaznamo odstopanja in se nanje ustrezno odzovemo. V magistrski nalogi smo razvili in izdelali prototip senzorskega sistema za zajem in analizo podatkov v realnem času s podporno spletno aplikacijo. Mikrokontroler NodeMCU skrbi za komunikacijo s senzorji za temperaturo, vlago, kisik, ogljikov dioksid, etilen in svetlobo; podatke pa zapisuje na spominsko kartico ali jih preko Wi-Fi povezave pošilja na strežnik. Na podlagi izmerjenih temperatur smo dinamično napovedovali dobo uporabnosti rib, sistem pa smo preizkusili tudi z analizo zorenja sadja in zelenjave. Preverjali smo pogoje hranjenja in na osnovi pridobljenih meritev predstavili rezultate senzorskih sistemov ter vpliv tvorbe etilena v jabolkih na kumare.

Ključne besede

internet stvari, mikrokontroler, senzorji, hladna veriga, doba uporabnosti

Abstract

Title: Sensor system with real time data analysis

Maintaining and controlling the appropriate temperature and other conditions of the cold chain for perishable products is important research area, since in case of improper handling, we lose huge amounts of food. With the implementation of smart sensor systems and algorithms, we can detect deviations and respond appropriately to them. In the master's thesis, we developed a prototype sensor system for real-time data monitoring and analysis with a supportive web application. The microcontroller NodeMCU ensures communication with sensors for temperature, humidity, oxygen, carbon dioxide, ethylene and light; the data is recorded on a memory card or sent via Wi-Fi connection to the server. Based on temperature measurements, we dynamically predicted the shelf life of the fish. We tested our system with fruit and vegetables for analysis of ripening under cold storage conditions and the effect of ethylene in apples on cucumbers.

Keywords

Internet of Things, Microcontroller, Sensors, Cold chain, Shelf life

Poglavje 1

Uvod

Shranjevanje sveže in hitro pokvarljive hrane je v resnici veliko bolj problematično, kot si predstavljamo. To dejstvo potrjujejo številne študije, ki ocenjujejo, da letno zavržemo kar tretjino oz. 1,3 milijarde ton proizvedene hrane [31]. Največ hrane zavržejo končni potrošniki, ki občutljive proizvode shranjujejo na neprimernih mestih, kupujejo več kot porabijo ali pa ne upoštevajo navodil. Zanimarljiva ni niti količina hrane ali sestavin, ki jih zavržejo proizvajalci. Srečujejo se s težavami, kot so: dolge transportne poti, občutljive sestavine in sestavine slabše kvalitete, zastareli hladilni sistemi, neprimerno ravnanje prevoznikov, vremenski vplivi in še marsikaj. Vzdrževanje primernih pogojev za ohranjanje varnosti in čim boljše kakovosti živil od proizvodnje do porabe je povezano s pojmom *hladna veriga*.

Proizvodni in distribucijski postopki so dandanes izpopolnjeni in v sodelovanju z informacijsko-komunikacijskimi tehnologijami dobro nadzorovani. Njihova uporaba omogoča nadzor in optimizacijo tako proizvodnje in skladiščnih/hladilnih prostorov kot tudi transporta in trgovskih polic. Revolucijo na omenjenem področju predstavlja internet stvari (ang. Internet of Things) [35], ki definira nove standarde medsebojnega povezovanja senzorskih in drugih naprav, prisotnih v hladni verigi, podatke pa lahko v realnem času spremljamo kjerkoli in kadarkoli. Splošno uporabnost in razširjenost interneta stvari omogočajo dostopne, majhne in enostavne procesorske enote s sen-

zorji.

Hrana, cepiva in drugi temperaturno občutljivi proizvodi imajo določeno dobo uporabnosti, ki velja le ob upoštevanju predpisanih pogojev shranjevanja. Večino pogojev zadovoljimo z vzdrževanjem primerno nizke temperature, kar pa ni vedno mogoče. Posledično se doba uporabnosti skrajša, v najslabšem primeru pa se proizvod pokvari. Tako potrošnika kot tudi proizvajalca zanima, kaj se dogaja s proizvodi, zato je zelo pomembna njihova sledljivost. Dogajanja lahko spremljamo z zapisovalniki podatkov (ang. Data logger), ki jih namestimo neposredno na embalažo [31, 44, 45, 41]. Po pregledu podatkov lahko z gotovostjo presodimo o uporabnosti proizvoda, s primernim algoritmom pa lahko izračunamo novo dobo uporabnosti [30]. Spremljanje dogajanja v hladni verigi je enostavnejše s senzorskimi sistemi, saj podatke sproti posredujejo v internetno omrežje [43, 42].

V magistrski nalogi smo pristopili k reševanju problema hladne verige hitro pokvarljivih živil in ga razširili na področje shranjevanja sadja in zelenjave, kjer poleg temperature in vlage na kvaliteto vplivajo tudi koncentracije plinov. Zasnovali in izdelali smo senzorski sistem, ki omogoča merjenje temperature in vlage ter meritve sproti pošilja na strežnik. Je majhen in enostaven za uporabo, namestimo pa ga lahko kjerkoli, kjer je na voljo Wi-Fi povezava. Sistem smo dopolnili s spletno aplikacijo za nadzor senzorskih sistemov, obdelavo meritev in napovedovanje dobe uporabnosti. V drugi fazi smo se posvetili zorenju sadja in zelenjave, ki zaradi svoje občutljivosti potrebuje posebno pozornost. V procesu zorenja smo želeli analizirati še druge vplive, zato smo senzorski sistem nadgradili s plinskimi senzorji za kisik, ogljikov dioksid in etilen ter s senzorjem za svetlobo. Ker Wi-Fi povezava ni vedno na voljo, smo dodali možnost shranjevanja podatkov na spominsko kartico in definirali več različnih načinov delovanja, vključno s filtriranjem meritev in pošiljanjem obvestil o odstopajočih meritvah.

V drugem poglavju predstavljamo koncept in pomen interneta stvari, možnosti uporabe v hladni verigi ter raziščemo obstoječe senzorske sisteme. Predstavimo tudi dobo uporabnosti in postopke napovedovanja. Tretje po-

glavje vsebuje opis senzorskega sistema. Najprej določimo zahteve in funkcionalnosti pri načrtovanju, nato pa predstavimo komponente strojne opreme in implementacijo. Poglavje vsebuje tudi predstavitev spletne aplikacije, komunikacijo senzorskega sistema z aplikacijo ter konfiguracijo in uporabo. Kalibracijo in testiranje senzorskih sistemov opišemo v četrtem poglavju. V petem poglavju predstavimo eksperimente hladne verige v kleti in dobo uporabnosti za brancina ter zorenje sadja in zelenjave tako, da analiziramo koncentracije plinov. Na koncu v sklepnih ugotovitvah povzamemo vsebino našega dela.

Poglavje 2

Pregled področja

2.1 Internet stvari

Nadzor in spremljanje različnih sistemov z enega kontrolnega mesta ponuja ogromno prednosti, ki jih lahko izkoristimo v najrazličnejše namene. Bodisi je to nadzor proizvodne linije, hladilnice, transportnega vozila, bodisi pametnega stanovanja ali samo sobne vremenske postaje. Področje medsebojno povezanih računalniških, mehanskih in digitalnih naprav ter predmetov, živali in ljudi, ki so na voljo z edinstvenimi identifikatorji in sposobnostjo za prenos podatkov prek omrežja brez sodelovanja človeka imenujemo internet stvari (ang. Internet of Things) [1].

Pojem *Internet stvari* se je pojavil leta 1999. Takrat se je tematika, ki jo je obravnaval, zdela še popolna znanstvena fantastika, danes pa je čista realnost. Svet je vse bolj povezan in na številnih področjih se srečujemo s t. i. “pametnimi napravami”. Na nekatere smo že povsem navajeni, ali pa so tako dobro integrirane v vsakdanje življenje, da jih sploh ne opazimo. Število naprav, povezanih v internet, se danes šteje v milijardah, napoved za prihodnost pa je še bolj obetajoča. Cilj interneta stvari je povezovanje med napravami, ne glede na proizvajalca, operacijski sistem ali način komunikacije. Na trgu obstaja ogromno načinov komunikacije in se od proizvajalca do proizvajalca razlikujejo. V ta namen obstajajo organizacije, ki zagotavljajo

standarde na tem področju: ETSI (European Telecommunications Standards Institute), IEEE SA (Institute of Electrical and Electronics Engineers Standards Association), W3C (World Wide Web Consortium), Wi-Fi Alliance in druge.

Internet stvari potrebuje za delovanje v realnem času [35] ustrezno infrastrukturo, zagotovljeno povezljivost v internetno omrežje in komunikacijske protokole. Najbolj pogosti protokoli so MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), CoAP (Constrained Application Protocol), XMPP (Extensible Messaging and Presence Protocol), STOMP (The Simple Text Oriented Messaging Protocol). Poleg naštetih protokolov zasledimo tudi REST (Representational state transfer), SOAP (Simple Object Access Protocol) in WebSocket. Vsak od teh protokolov je široko uporabljen, zanje pa obstaja ogromno različnih implementacij in kombinacij. Internet stvari danes sicer uporablja preko 100 različnih protokolov [25].

Ključni elementi interneta stvari so vozlišča, ki povezujejo naprave in omogočajo manipulacijo z zajetimi podatki. Na trgu obstaja mnogo platform za gostovanje projektov IoT, ki poleg plačljive verzije običajno ponujajo tudi brezplačno različico. Med njimi se najpogosteje omenjajo *Amazon Web Service*, *Microsoft Azure*, *ThingWorx IoT Platform*, *IBM's Watson*, *Cisco IoT Cloud Connect*, *Salesforce IoT Cloud*, *Oracle Integrated Cloud*, *GE Predix*. Uporabnikom ponujajo integracijo in upravljanje naprav, varnost, različne komunikacijske protokole ter analizo in vizualizacijo podatkov.

2.2 Hladna veriga

V številnih gospodarstvih, še posebej na področju prehrane, je potrebno zagotavljati ustrezne pogoje ravnanja z izdelki, ki so opredeljeni z naslednjo definicijo:

Hladna veriga pomeni vzdrževanje predpisane, dovolj nizke temperature živila, da ohranimo varnost in čim boljšo kakovost živila

v celotni živilski verigi; od proizvodnje, prevoza, shranjevanja in razdeljevanja do porabe pri končnem potrošniku [16].

Kakovostna, predvsem pa zdrava živila so ključnega pomena za končnega potrošnika. Zanimajo ga številne podrobnosti o hrani, ki se znajde na njegovem krožniku. Takšne informacije je mogoče zagotoviti le z ustreznim nadzorom živil vse od proizvodnje do prodaje. Trendi hladne verige so usmerjeni v implementacijo “pametnih” senzorskih sistemov. Ta bi modernizirala tradicionalno hladno verigo in posredno zmanjšala delež zavržene hrane [27], predvsem z dinamičnim napovedovanjem dobe uporabnosti.

Ključni dejavnik hladne verige je temperatura, ki pri hitro pokvarljivih živilih (meso, ribe, mleko, mlečni izdelki in drugo) vpliva na razvoj mikroorganizmov. Vzdrževanje predpisane temperature tudi v modernem svetu predstavlja velik problem, zato pogosto zasledimo nepravilnosti [38]. Zagotavljanje primernih pogojev je bistvenega pomena tudi pri sadju in zelenjavi, saj ti vplivajo na respiracijo oz. dihanje in posledično na propadanje plodov [32]. Pri sadju in zelenjavi lahko omenjene procese upočasnimo s kemijsko obdelavo, vendar s tem poslabšamo kakovost živil. Poleg temperature je pomembna tudi vlažnost. Prenizka vlažnost povzroča izsušitev plodov, previsoka pa pospeši propadanje.

Problematika hladne verige je v različnih delih sveta različno obravnavana. Vzdrževanje predpisanih pogojev predstavlja velik problem, saj se pri tem porabi veliko energije, težavo pa predstavlja tudi transport, katerega onesnaževanje ni zanemarljivo. Zaradi nepravilnosti lahko posledično zavržemo večje količine hrane ali drugih proizvodov. V logistiki se uveljavlja pojem “Zelena hladna veriga” (ang. Green Cold Chain) [39]. Izboljšavo je mogoče doseči z nadzorovano proizvodnjo, energetske učinkovitejšimi hladilnimi sistemi in skladišči, ekološko sprejemljivo embalažo ter primernim informacijskim sistemom za nadzor v realnem času.

2.3 Doba uporabnosti

Doba uporabnosti zagotavlja potrošniku, da je živilo varno za uživanje. Njena definicija zajema pojma *datum minimalne trajnosti* in *datum uporabe*:

Datum minimalne trajnosti je pojem, ki se prvotno nanaša na kakovost živila in je običajno označen na izdelkih, ki imajo daljši čas uporabe (moka, testenine itn.), z oznako “uporabno najmanj do ...” oziroma “uporabno najmanj do konca ...”.

Datum uporabe se nanaša predvsem na varnost živila in se uporablja za označevanje hitro pokvarljivih živil (sveže mleko, meso itn.). Na izdelkih se običajno označuje z izrazom “porabiti do ...”. V tem primeru je na živilu obvezna oznaka natančnega datuma in navodila glede shranjevanja živila [17].

Potrošnik ima na vsakem pokvarljivem proizvodu podatek o dobi uporabnosti. Izdelki s krajšo dobo uporabnosti imajo označen natančen datum poteka, medtem ko imajo izdelki z daljšo dobo lahko podano samo leto. Proizvajalec zagotavlja kakovost živila samo do podanega datuma.

Metode, ki so na voljo za določanje dobe uporabnosti, so zasnovane na mikrobioloških in senzoričnih testih vzorcev živil. Rezultati so povezani z analizami za konstantne temperaturne režime hranjenja (0 °C, 5 °C, 10 °C, 15 °C) v določenih časovnih intervalih (nekaj ur, dni).

Določitev dobe uporabnosti je ena izmed glavnih težav, s katero se srečujejo proizvajalci pri razvoju novih proizvodov ali menjavi sestavin v obstoječih proizvodih. Pri tem je zelo pomemben postopek proizvodnje, pakiranja in shranjevanja. Na dobo uporabnosti vplivajo tako notranji (kakovost sestavin, aktivnost vode, vrednost PH, redukcijsko-oksidacijske reakcije ...) kakor tudi zunanji dejavniki (temperatura, relativna vlažnost, svetloba, mehanske poškodbe ...). Določitev dobe uporabnosti je še posebej težavna pri proizvodih z večmesečno življenjsko dobo [6].

Proizvajalci si pri določitvi dobe uporabnosti pomagajo z različnimi metodami:

- **Neposredna metoda (ang. Direct method).** Metoda predpisuje testiranje in opazovanje proizvoda v realnem času. Ni primerna za proizvode z daljšo dobo uporabnosti.
- **Test izziva (ang. Challenge test).** Proizvodu dodajo mikroorganizme in opazujejo ter analizirajo njegov odziv.
- **Mikrobiološko napovedovanje (ang. Predictive microbiology).** Na podlagi preteklih mikrobioloških študij se napove pričakovan odziv proizvoda in določi njegovo dobo uporabnosti.
- **Pospešeni test (ang. Accelerate shelf life tests).** Proizvod je izpostavljen okolju s povišano temperaturo, koncentracijo kisika in drugimi dejavniki. Na podlagi reakcije proizvoda se določi doba uporabnosti.
- **Metoda preživetja (ang. Survival method).** Doba uporabnosti se določi na podlagi odziva uporabnikov.

Predpisana doba uporabnosti velja ob točno določenih pogojih. Takoj, ko se pogoji spremenijo, se skrajša tudi doba uporabnosti. Največji vpliv pri spreminjanju ima temperatura, zato je smiselno dinamično napovedovanje [30]. Takšen primer je opisan tudi v magistrski nalogi “Napovedovanje dobe uporabnosti na podlagi senzorskih podatkov v hladni verigi” [37]. Avtor je z namenskim senzorskim sistemom spremljal temperaturo ribe, nato pa na podlagi preteklih meritev temperature shranjenih na zapisovalniku podatkov RFID določil novo dobo uporabnosti.

2.4 Plini v hladni verigi sadja in zelenjave

V hladni verigi sadja in zelenjave se srečamo tudi s plini, kot so kisik, ogljikov dioksid in etilen. Ker vplivajo na zorenje in respiracijo plodov, je pomembno analizirati in upoštevati njihov odziv na določene pline in kateri ga proizvajajo.

Respiracija je kemijski proces, kjer v reakciji glukoze in kisika nastajajo ogljikov dioksid, voda in energija. Določeni plodovi po obiranju še vedno dihajo, kar pomeni, da zorijo, to pa na koncu vodi v gnitje [21]. Določene procese je mogoče upočasniti z nižjo temperaturo ali zmanjšanjem koncentracije kisika.

Sadje in zelenjavo, ki zori tudi po obiranju, uvrščamo med klimakterijsko sadje. Posebnost te vrste je, da pri zorenju sproščajo mnogo več etilena [23]. To so jabolka, banane, hruške, breskve, mango, paradižnik itd. Na nasprotni strani je neklimakterijsko sadje in zelenjava, ki po obiranju samo še propada: jagode, limone, ananas, ribez, kumare, jajčevci itd. Respiracija je še posebej opazna pri klimakterijskem sadju, etilen, ki ga pri tem sproščajo, pa lahko pri neklimakterijski vrsti močno pospeši propadanje.

Etilen je plin, ki pri sadju in rastlinah deluje kot hormon, ki pospeši proces njihovega zorenja. Sinteza etilena poteka v celicah sadja in s sproščanjem v njihovo okolico pospešuje lastno zorenje ter vpliva tudi na sadje v okolici. Etilen učinkuje pri zelo nizkih koncentracijah, saj že koncentracija manjša od 1 ppm sproži proces zorenja pri klimakteričnem sadju in s tem vpliva na njegovo obstojnost. Na trajnejšo obstojnost dobrin na poljih trgovin pomembno vplivajo tudi razmere v dobavni verigi hitro pokvarljivih plodov. Prilagojena in kontrolirana atmosfera v prostorih za transport je ključna za ohranitev svežine pokvarljivega tovora, saj lahko z nadzorom pogojev zagotovimo zeleno presnovno obnašanje sadja. Zato poznavanje koncentracije etilena v okolici sadja predstavlja zelo dobro oceno stopnje njihove zrelosti in oceno predvidenega roka trajanja [10].

V hladni verige sadja in zelenjave je zato zelo pomembno, da zaradi vpliva etilena ne shranjujemo različnih vrst v istem prostoru. Prav tako moramo biti pozorni na prisotnost kisika, ki omogoča respiracijo in posledično propadanje plodov. Ob tem se sprošča ogljikov dioksid, ki v majhnih koncentracijah

ni nevaren, v večjih pa lahko povzroča glavobole in utrujenost, v skrajnih primerih pa tudi omotico, izgubo zavesti in zadušitev [28].

2.5 Senzorski sistemi

Spremljanje temperature posameznega živila je zagotovljeno s temperaturnimi senzorji, ki so vključeni v tehnologijah RFID (Radio Frequency Identification) in Bluetooth [31]. Senzorje so namestili v škatle, nato pa podatke zajemali s pomočjo bralnika RFID. Raziskava kaže, da na dobo uporabnosti vpliva že majhna sprememba temperature ($0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Navajajo, da bi takšen sistem lahko močno pripomogel k zagotavljanju kvalitete živil, stroški implementacije pa so zanemarljivi. Izsledke študije so potrdili z anketiranjem udeležencv v hladni verigi. Tehnologija RFID v kombinaciji z mikroskopskimi temperaturnimi senzorji je primerna za t. i. senzorske nalepke, ki so nameščene na čisto vsak temperaturno občutljiv izdelek [44]. Njena prednost je v tem, da ne potrebuje dodatnega vira napajanja. Poleg majhnosti in cenovno ugodne proizvodnje je to ključna prednost za uporabo v hladni verigi [47]. Bralnik, ki je lahko tudi pametni telefon, aktivira nalepko in prebere vrednosti senzorjev, prebrane podatke pa nato obdela in predstavi rezultate.

Cenovno dosegljivi senzorji in pametni telefoni v kombinaciji s funkcionalnostmi, ki jih ponujajo so kot nalašč za sledenje produktom v hladni verigi. Mobilnost, dostopnost, visoka zmogljivost, povezljivost in enostavna uporaba so v kombinaciji s kvalitetnimi senzorji nepogrešljiv del hladne verige. Vse te prednosti so prepoznali avtorji Alfian, Syafuridin in Rhee in predstavili senzorski sistem, ki temelji na lastnostih pametnih telefonov [26]. Zasnovali so dodatek za pametni telefon, ki nadzoruje temperaturo in relativno vlažnost ter uporabili že obstoječe senzorje: senzor pospeška, kompas, žiroskop, GPS (Global Positioning System), mikrofoni in kamero. Sistem je neprestano spremljal stanje v hladni verigi in podatke preko brezžičnega omrežja pošiljal v spletno aplikacijo. Korejsko podjetje jim je omogočilo, da so ga namestili pri proizvajalcu, prevozniku, distributerju in ponudili tudi potrošniku. S študijo

so preverili zmogljivost pametnih telefonov in smislenost uporabe v hladni verigi ter ugotovili, da imajo v kombinaciji z zmogljivim zalednim sistemom dobre možnosti uporabe v hladni verigi. Dodatne prednosti pametnih mobilnih telefonov so povezovanje v omrežje s standardi, ki omogočajo hiter in kvaliteten prenos podatkov: GSM (Global System for Mobile communications), UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), HSDPA (High Speed Downlink Packet Acces), HSUPA (High Speed Uplink Packet Access) in podobni. Telefoni imajo dobro razvito komunikacijo preko omrežja Wi-Fi in NFC (Near Field Communication), kar omogoča avtomatizacijo poslovnih procesov, pridobivanje podatkov v realnem času, zmanjšanje poslovnih stroškov itd. Telefonov sicer ne moremo pustiti v hladilnicah, lahko pa z njimi beremo senzorske značke in s tem pridobimo podatke o dogajanju v hladni verigi [45].

Popularnost spremljanja hladne verige so dobro izkoristili v nizozemskem podjetju XSense [24]. Ponudili so istoimenski komercialni produkt senzorskega sistema in aplikacije za nadzor hladne verige. Sistem sestoji iz majhnih senzorskih modulov za temperaturo in vlažnost, bralne postaje in oblačne storitve. Predstavlja dovršen način merjenja in beleženja ter analize podatkov.

Pomemben del hladne verige predstavlja transport. Neustrezen transport lahko drastično zmanjša uporabnost živila [41]. Avtorji so izdelali senzorski sistem in ga namestili v transportni kabini. Preko brezžičnega vmesnika so ga povezali na komercialno platformo IoT. Zajemal je podatke o temperaturi, relativni vlažnosti, svetlobi in odpiranju vrat transportne kabine. Podatke je pošiljal po brezžični povezavi, ki žal ni vedno na voljo. Tovrstno problematiko opisujejo avtorji članka [46] in kot rešitev predlagajo uporabo GSM/GPRS omrežja, s čimer zagotovijo večjo pokritost s signalom.

Hladna veriga je pravzaprav širši pojem, ki ne zajema le transporta živil, temveč tudi zdravil, cepiva in ostalih produktov s strogo predpisanimi pogoji shranjevanja. Problematika transporta in hrambe cepiva je še posebej prisotna v manj razvitih državah. S to tematiko so se soočili nemški raziskovalci in razvili sistem za spremljanje temperature in relativne vlažnosti zraka s

cenovno ugodnim računalnikom RaspberryPi in mikrokrmilnikom Arduino [42]. Mikrokrmilnik je povezoval množico senzorjev ter podatke pošiljal na računalnik, kjer je bila nameščena nadzorna aplikacija. Sistem so uspešno preizkusili v skladišču.

Implementacija senzorskih sistemov ni vedno enostavna in cenovno sprejemljiva. Rešitev predstavlja senzorski sistem FoneAstra[29], ki temelji na uporabi mobilnega telefona z dodanimi temperaturnimi senzorji in je namenjen spremljanju temperature v hladni verigi. FoneAstra s strežnikom komunicira preko sporočil SMS, meritve pa beleži na vgrajeno spominsko kartico in jih na vsaki dve uri pošilja na strežnik. Brez dodatnega napajanja deluje do dva tedna in je neodvisen od interneta. Sistem so preizkusili v različnih delih hladne verige cepiv v Albaniji.

Senzorski sistemi so zgrajeni na najrazličnejših platformah. Pogosto se pojavljata RaspberryPi in Arduino, vse bolj popularna platforma pa je NodeMCU z integriranim brezžičnim modulom [43]. Avtorji so s pomočjo cenovno ugodnega in zmogljivega mikrokrmilnika izdelali sistem za merjenje temperature in relativne vlažnosti v laboratoriju. Meritve so shranjevali na strežniku in jih prikazovali v spletni aplikaciji. Podoben način senzorskega sistema lahko uporabimo tudi za spremljanje vremena. Ko sistem razširimo še z drugimi senzorji za tlak, količino padavin in svetlobo, dobimo čisto pravo vremensko postajo [34].

Na trgu obstaja veliko komercialnih rešitev za merjenje temperature in relativne vlažnosti v hladni verigi (ang. Cold Chain Data Logger). Podjetja ponujajo majhne naprave ali nalepke, ki beležijo temperaturo in relativno vlažnost. Uporabnik lahko sam določi način delovanja. Izmerjene vrednosti je mogoče prebrati na več različnih načinov, med katerimi so najpogosteje uporabljeni: USB, Bluetooth in RFID. Med večje ponudnike sodijo: Extech, MadgeTech, MicroDAQ, Omega, Global Cold Chain Solutions, Verigo, EasyLog, Termotel ...

Poglavje 3

Senzorski sistem

V magistrski nalogi smo razvili dve različici senzorskega sistema. Osnovna izvedba (SS-TH) vključuje senzorja za temperaturo in relativno vlažnost, medtem ko razširjen senzorski sistem (SS) vsebuje še plinske senzorje za merjenje etilena, kisika in ogljikovega dioksida. Dodan je tudi senzor svetlobe, ki bi zaznaval odpiranje in zapiranje prostora.

3.1 Zahteve in funkcionalnosti

Za delovanje senzorskega sistema, ki vključuje tudi nadzorni in predstavitveni del, so bile postavljene naslednje zahteve:

- Zajem podatkov o temperaturi, vlagi, kakovosti zraka in svetlobi.
- Shranjevanje podatkov v lokalnem spominu senzorskega sistema (ang. off-line).
- Povezovanje sistema z brezžičnim omrežjem za sprotno pošiljanje na strežnik (ang. on-line).
- Strežnik za shranjevanje meritev in obdelavo podatkov.
- Spletna aplikacija za upravljanje sistema in vizualizacijo podatkov.

- Filtriranje podatkov v senzorskem sistemu in v spletni aplikaciji.
- Napovedovanje preostale dobe uporabnosti v odvisnosti od temperature.

Kakovost zraka v zaprtih prostorih običajno določa delež ogljikovega dioksida in kisika [28], zato smo v drugi fazi osnovni senzorski sistem (SSTH) nadgradili s **senzorjema za zaznavanje ogljikovega dioksida in kisika**. Namen senzorskega sistema je spremljati hladne verige, pri kateri se srečujemo tudi s sadjem in zelenjavo. Določene vrste pri zorenju in propadanju sproščajo etilen, zato smo dodali še **senzor za zaznavanje etilena** [36].

3.2 Strojna oprema

3.2.1 Mikrokrmilnik NodeMCU

NodeMCU [18] je nizkocenovna odprtokodna razvojna ploščica, namenjena predvsem za razvoj naprav, ki jih srečamo na področju interneta stvari. Je interaktiven, programabilen in enostaven krmilnik z vgrajenim brezžičnim modulom, ki omogoča enostavno povezovanje z internetom. Ravno to je bila ključna lastnost pri izbiri mikrokrmilnika za naš senzorski sistem. Razvojno ploščico NodeMCU poganja ESP8266-E12, ki ima vgrajen 32-bitni procesor in pomnilnik velikosti 4MB. Modul ponuja brezžično komunikacijo po standardu IEEE 802.11 b/g/n, podpira množico protokolov TCP/IP, ima vgrajen 10-bitni analogno-digitalni pretvornik in še mnogo več. Za razvoj imamo na voljo 8 digitalnih in en analogni vhod/izhod. Mikrokrmilnik lahko programiramo z več različnimi razvojnimi okolji in jeziki, med katerimi je najbolj enostaven Arduino IDE s programskim jezikom C [5].

3.2.2 Brežični modul ESP-01

ESP-01 je popoln in neodvisen sistem za povezovanje z Wi-Fi omrežjem. Vgrajen ima procesor, pomnilnik in 2 vhodno/izhodna priključka. Je cenovno ugoden, varčen, majhen in praktičen za uporabo [9]. Poganja ga brezžični modul ESP8266-01, ki ga v razširjeni različici zasledimo tudi pri NodeMCU. Programiranje poteka na enak način kot NodeMCU, program pa nanj naložimo preko vmesnika FTDI (ang. Future Technology Devices International).

3.2.3 Senzorji

Senzorski sistem sestavljajo štiri analogni in en digitalni senzor. Digitalni združuje senzor za temperaturo in relativno vlažnost, medtem ko analogni senzorji merijo posamezne pline in svetlobo (Tabela 3.1).

Senzor	Oznaka	Merilno območje	Odstopanje
Temperatura	DHT-22	-40 °C do +80 °C	0,5 °C
Relativna vlažnost	DHT-22	0 do 100 %	2-5 %
Ogljikov dioksid	MG-811	350 do 10.000 ppm	ni podatka
Kisik	ME3-O2	0 do 30 %	2 %
Etilen	ME3-C2H4	0 do 100 ppm	1 %
Svetloba	GL5516	0 do 100 lux	5 %

Tabela 3.1: Seznam senzorjev s podatki o merilnem območju in pričakovanim odstopanjem.

Senzor za temperaturo in relativno vlažnost

Digitalni senzor DHT-22 je integriran senzor za temperaturo in relativno vlažnost [7]. Odlikuje ga dolga življenjska doba in enostavna uporaba. Omogoča zaznavanje temperature od -40 °C do +80 °C ter zračne vlažnosti od 0 do 100 %.

Komunikacija z mikrokontrolnikom poteka po vodilu 1-Wire. Za delovanje potrebuje le en podatkovni pin, ki je hkrati tudi napajalni. Z manjšo hitrostjo podatkov in daljšim dosegom je koncept delovanja podoben komunikaciji I2C, podatki pa že odražajo dejansko vrednost.

Senzor za ogljikov dioksid

Za merjenje ogljikovega dioksida (CO_2) smo izbrali senzor MG-811 [14], ker ima visoko občutljivost na ogljikov dioksid, hkrati pa zaznava tudi alkohol in ogljikov monoksid. Uporablja se za merjenje kvalitete zraka, nadzor fermentacije in detekcije koncentracije ogljikovega dioksida v bivalnih prostorih. Pline zaznava na podlagi kemijske reakcije, zato ga uvrščamo med elektrokemične senzore. Ko je izpostavljen ogljikovemu dioksidu, pride do oksidacije. Nastali elektroni povzročijo električno polje, katerega jakost lahko interpretiramo kot koncentracijo plina. Višja kot je koncentracija, več elektronov nastane pri oksidaciji, močnejše je električno polje. Občutljivost sensorja je od 350 do 10.000 ppm ogljikovega dioksida (koncentracija v zraku je okoli 400 ppm). Posebnost sensorja je grelna celica, ki deluje na napetosti 6V.

Komunikacija z mikrokontrolnikom poteka preko A/D pretvornika. Ta izmeri napetost izhodnega signala sensorja in jo pretvori v številsko vrednost, ki predstavlja koncentracijo ogljikovega dioksida.

Senzor za kisik

Za merjenje kisika (O_2) smo izbrali senzor ME3-O2 [13]. Princip delovanja je enak sensorju za ogljikov dioksid, in sicer na osnovi elektrokemične oksidacije ciljnega plina na elektrodi v notranjosti elektrolitske celice. Tok, ki nastane pri elektrokemijski reakciji, je neposredno sorazmeren s koncentracijo in sledi Faradayevemu indukcijskemu zakonu.

Senzor odlikuje nizka poraba, visoka natančnost, visoka občutljivost, širok linearni razpon zaznavanja, visoka ponovljivost in stabilnost. Uporablja se tako v industriji in pri varovanju okolja. Merilno območje sensorja je od 0 do 25 %, pri čemer je največja dovoljena koncentracija 30 %.

Senzor je analogni, komunikacija z mikrokmilnikom pa poteka na enak način kot pri senzorju za ogljikov dioksid preko A/D pretvornika.

Senzor za etilen

Za merjenje etilena (C_2H_4) smo izbrali senzor ME3-C2H4 [12]. Odlikuje ga nizka poraba, visoka natančnost in občutljivost na etilen s širokim razponom zaznavanja koncentracije. Senzor je zelo stabilen in zanesljiv. Uporablja se za zaznavanja etilena v industriji kot tudi na področju varovanja okolja. Uvrščamo ga med elektrokemične senzorje, saj je zaznavanje odvisno od elektrokemične oksidacije plina. Koncentracijo določimo na podlagi toka, ki teče skozi senzor. Poleg etilena je senzor občutljiv tudi na višje koncentracije drugih plinov (H_2S , SO_2 , H_2 , NO , NO_2), zato moramo pri meritvah upoštevati tudi ta podatek.

Občutljivost senzorja je med 0 in 100 ppm, pri čemer je maksimalno območje zaznavanja 200 ppm. Signal, ki ga oddaja senzor, je analogni. Koncentracijo etilena določimo na podlagi toka, in sicer 0,04 uA/ppm. Pri nizki koncentraciji je tok majhen, medtem ko je pri visoki koncentraciji tok višji. Senzor deluje v širokem temperaturnem območju in ima natančnost zaznavanja do 0,5 ppm. Njegova življenjska doba na čistem zraku je 3 leta.

Komunikacija z mikrokmilnikom poteka na enak način kot pri senzorju za ogljikov dioksid preko A/D pretvornika.

Senzor za svetlobo

Za merjenje svetlobe uporabimo foto upor GL5516 [11]. Občutljiv je na svetlobo, kar pomeni, da sorazmerno jakosti svetlobe spreminja svojo upornost: močnejša kot je svetloba, manjša je upornost. Senzor je občutljiv na vidno svetlobo, najboljšo odzivnost pa dosega pri valovni dolžini 540 nm t. i. zeleni svetlobi. Njegovo zaznavanje je logaritemsko in sega od 0 do 100 lux.

Senzor spada med analogne komponente, zato je komunikacija z mikrokmilnikom izvedena preko A/D pretvornika.

3.2.4 A/D pretvornik

Pri povezovanju analognih senzorjev naletimo na težavo, saj izbran mikrokrmilnik podpira le en analogni vhod. Odpravimo jo z analogno-digitalnim modulom ADS1015 [2], ki z mikrokrmilnikom komunicira preko digitalnega protokola I2C in omogoča priklop štirih analognih senzorjev. A/D pretvornik pretvori analogni signal z 12-bitno resolucijo, kar pomeni 2^{12} oz. 4096 različnih vrednosti. Vzorčenje signala poteka preko vgrajenega ojačevalnika, pri čemer vhodna napetost ne sme presegati izbranega razpona signala (Tabela 3.2).

Faktor ojačanja	Razpon signala	Resolucija [mV/enoto]
2/3	+/- 6.144V	3
1	+/- 4.096V	2
2	+/- 2.048V	1
4	+/- 1.024V	0.5
8	+/- 0.512V	0.25
16	+/- 0.256V	0.125

Tabela 3.2: A/D pretvornik pretvori analogni signal preko vgrajenega ojačevalnika, razpon vhodnega signala pa je predpisan z izbiro ojačitve.

Senzorski sistem uporablja osnovno ojačitev (2/3) z razponom signala med $-6,144$ V in $+6,144$ V. A/D pretvornik signal vzorči z 12 biti, kjer prvi bit označuje pozitiven oz. negativen signal, preostalih 11 pa velikost signala.

V naši implementaciji analogni senzorji vračajo signal med 0 in 3,3V. Najmanjša vrednost po pretvorbi je tako 0, največja pa 1100 enot.

3.2.5 Modul za spominsko kartico

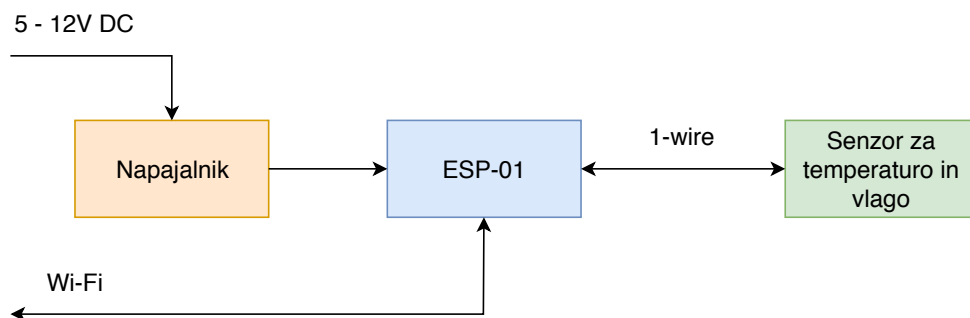
Senzorski sistem omogoča shranjevanje meritev na spominsko kartico. Modul je samostojna komponenta, ki z mikrokrmilnikom komunicira po podatkovnem vodilu SPI (angl. Serial Peripheral Interface Bus). Podpira standardne

kartice MicroSD do velikosti 32GB [15].

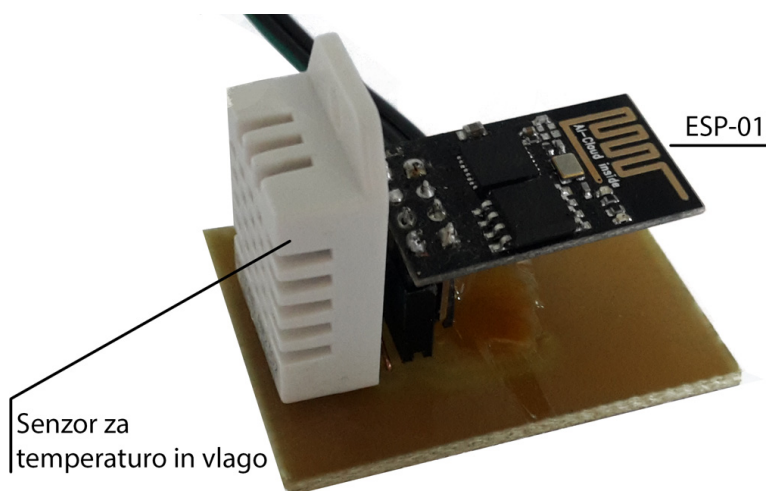
Senzorski sistem meritve zapisuje v besedilno datoteko CSV (ang. Comma-Separated Values), kjer stolpci predstavljajo časovno oznako in posamezne vrednosti senzorjev. Podrobnejša predstavitev zapisovanja podatkov je opisana v poglavju 3.5.

3.3 Implementacija SS-TH

Osnovni senzorski sistem (SS-TH) sestavljata brezžični modul ESP-01 in digitalni senzor za temperaturo ter relativno vlažnost DHT-22. Komponenti sta med seboj neposredno povezani (Slika 3.1) in za delovanje potrebujejo enosmerno napetost od 5 do 12 V. Sistem je namenjen zajemanju meritev za napovedovanje dobe uporabnosti. Deluje tako, da ESP-01 prejme senzorske meritve preko povezave 1-wire in jih pošilja direktno na strežnik. Delovanje senzorskega sistema je odvisno od Wi-Fi povezave, ki omogoča konfiguracijo in pošiljanje podatkov na strežnik. Interval merjenja je določen z eksperimentom, ki ga definiramo v spletni aplikaciji. Implementacija SS-TH je prikazana na Sliki 3.2. Materialni stroški izdelave senzorskega sistema SS-TH znašajo 5 € in vključujejo modul ESP-01 (3 €) ter senzor DHT-22 (2 €).



Slika 3.1: Shema vezja senzorskega sistema.



Slika 3.2: Senzorski sistem SS-TH.

3.4 Implementacija SS

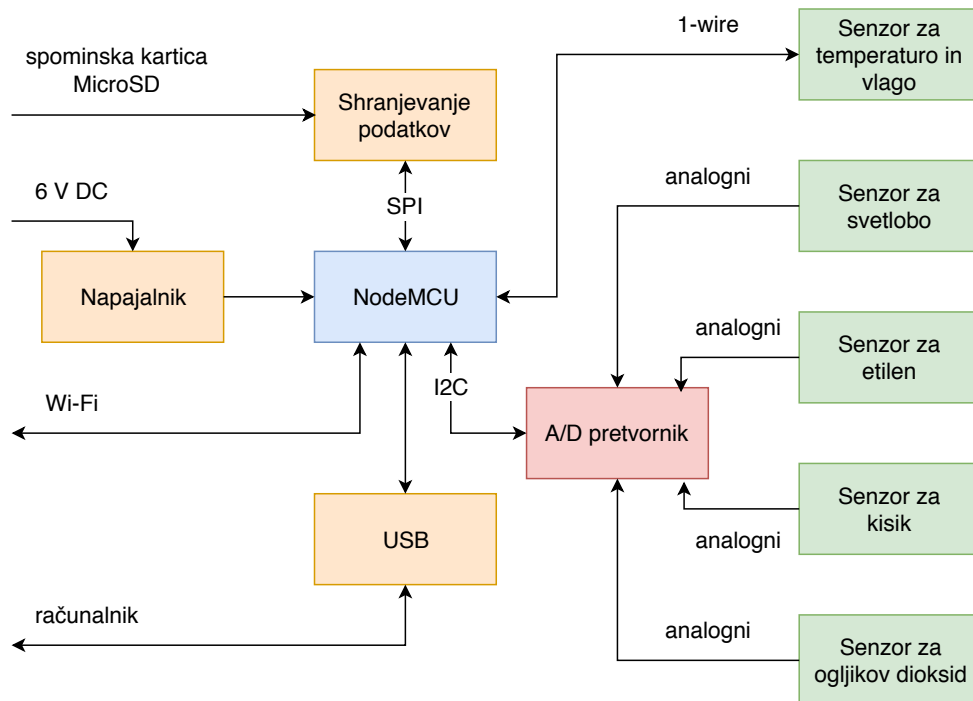
Senzorski sistem sestavljajo NodeMCU, A/D pretvornik ADS1015, digitalni senzor za temperaturo in relativno vlažnost DHT-22 ter analogni senzorji za etilen ME3-C2H4, kisik ME3-O2, ogljikov dioksid MG-811 in foto upor GL5516. Analogni senzorji so preko namenskega vezja priključeni na A/D pretvornik, digitalni senzor pa komunicira direktno z mikromilnikom (Slika 3.3).

NodeMCU skrbi za komunikacijo med senzorji, branje njihovih vrednosti in obdelavo prebranih podatkov za pošiljanje in zapisovanje. Skrbi za ponavljajoče izvajanje meritev in komunikacijo s spletno aplikacijo. Deluje v naslednjih načinih:

1. Posredovanje podatkov na serijski izhod (sistem je preko vmesnika USB povezan z računalnikom).
2. Zapis podatkov na spominsko kartico (Način "Off-line", ko ni na voljo interneta).
3. Posredovanje podatkov v spletno aplikacijo preko protokola HTTP in

vmesnika API.

4. Zapis podatkov na spominsko kartico in posredovanje v spletno aplikacijo.
5. Povprečenje meritev¹ ter zapis na spominsko kartico in posredovanje v spletno aplikacijo.
6. Povprečenje meritev in posredovanje v spletno aplikacijo.



Slika 3.3: Shema vezja senzorskega sistema.

Senzorski sistem je zelo kompleksen zaradi vključitve večjega števila različnih senzorjev. Sestavlja ga skoraj 100 različnih elementov: mikrokrmilnik, senzorji, napajalnik, analogno-digitalni pretvornik, modul za spominsko kartico ter druge električne komponente (upori, kondenzatorji, tranzistorji, konektorji ...). Povezovanje komponent je bilo z žicami skoraj nemogoče, zato

¹Sistem izvede 5 meritev in izračuna povprečno vrednost.

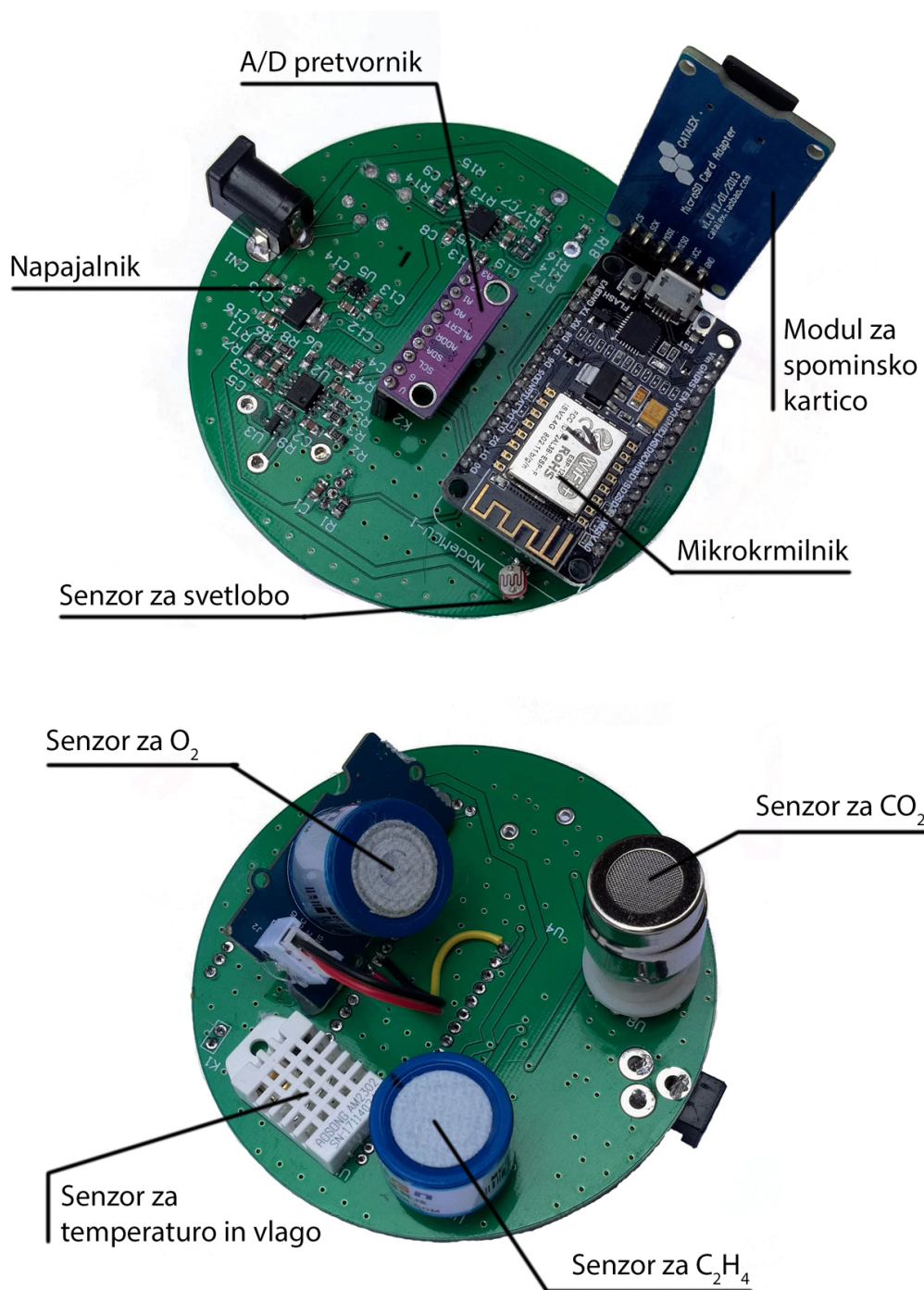
smo izdelali tiskano vezje PCB (ang. Printed Circuit Board). Načrtovanje vezja je potekalo na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani, kjer smo s strokovnjaki mikroelektronike proučili komponente senzorskega sistema in izdelali načrt.

Glavni cilj pri izdelavi vezja je bil homogen sistem, ki zavzema čim manj prostora. Na podlagi tehničnih specifikacij in obstoječih primerov povezovanja komponent smo določili pozicije komponent ter jih povezali med seboj. Tekom proučevanja in preizkušanja senzorjev smo ugotovili, da imajo analogni senzorji zelo ozek razpon signala. Takšnega signala analogno-digitalni pretvornik ne more dovolj natančno zaznati, zato smo izdelali tudi ustrezne ojačevalnike signala.

Vezje smo načrtovali s programskim paketom Altium Designer [4], ki omogoča avtomatizacijo skozi celoten proces načrtovanja. V eni sami aplikaciji združuje shematsko zasnovo, načrtovanje tiskanega vezja, načrtovanje FPGA (ang. Field-Programmable Gate Array) vezja, razvoj vgrajene programske opreme in izvoz dokumentov za končno proizvodnjo.

Rezultat načrtovanja je bila 2-slojna ploščica PCB, premera 85 mm, na njej pa so bile nameščene prav vse komponente (Slika 3.4). Testne različice smo izdelovali z računalniško vodenim gravirnim strojem, izdelavo končne različice pa smo naročili pri podjetju PCBWay [19]. V zadnji fazi je sledilo še ročno spajkanje komponent in testiranje povezav med njimi.

Materialni stroški izdelave senzorskega sistema so prikazani v Tabeli 3.3, kjer vrednost senzorjev predstavlja 80 % vseh stroškov.



Slika 3.4: Prototip senzorskega sistema (SS) s senzorji temperature, vlage, plinov (etilen – C_2H_4 , kisik – O_2 , ogljikov dioksid – CO_2) in svetlobe.

	Strošek [€]
Izdelava PCB	3
Mikrokontrolnik NodeMCU v1.0	5
Senzor za temperaturo in relativno vlažnost DHT-22	2
Senzor za kisik ME3-O2	30
Senzor za ogljikov dioksid MG811	30
Senzor za etilen ME3-C2H4	60
A/D pretvornik	2
Modul za spominsko kartico in kartica	8
Drobni material (upori, kondenzatorji, konektorji, integrirani čipi)	10
Napajalnik	5
SKUPAJ	155

Tabela 3.3: Materialni stroški implementacije enega senzorskega sistema.

3.5 Podatki

Senzorski sistem pošilja podatke na serijski izhod in jih zapisuje v podatkovno bazo ali na spominsko kartico.

Serijski izhod

Senzorski sistem podatke pošilja preko povezave USB na računalnik. Vsaka prejeta vrstica predstavlja stanje senzorjev, vrednosti pa so med seboj ločene z vejicami: čas, relativna vlažnost, temperatura, ogljikov dioksid, etilen, kisik in svetloba. Serijski izhod lahko beremo z Arduino IDE [5].

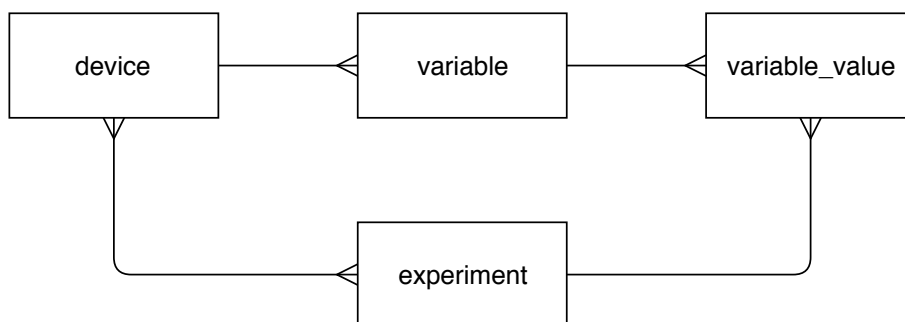
Spominska kartica

Podatki so na spominski kartici zapisani v obliki datoteke CSV. Vsak eksperiment ima svojo datoteko, ki je poimenovana enako kot eksperiment. Na

začetku datoteke se v posamezni vrstici nahajajo podatki o eksperimentu: čas začetka, način delovanja in interval vzorčenja. Nato sledijo podatki, ki so zapisani v naslednji obliki: čas, relativna vlažnost, temperatura, ogljikov dioksid, etilen, kisik in svetloba.

Podatkovna baza

Senzorski sistem pošilja podatke na strežnik, v formatu JSON, preko vmesnika API. Tam jih spletna aplikacija prebere in zapiše v podatkovno bazo. Vsaka senzorska meritev predstavlja ločen vnos v tabeli “variable_value” s podatki: ID, čas, ID_spremenljivke, ID_eksperimenta in vrednost. Podatkovna baza vsebuje poleg tabel prikazanih na Sliki 3.5: “alarm”, “event”, “experiment_event”, “user”, “ref_measurement”, in “working_mode”.



Slika 3.5: Delna shema podatkovne baze.

3.6 Spletna aplikacija

Spletna aplikacija je namenjena upravljanju enega ali več senzorskih sistemov, shranjevanju podatkov in njihovi obdelavi ter vizualizaciji. Podatke prikazuje v tabelarični obliki ter v obliki interaktivnih grafikonov, omogoča pa tudi nadzor delovanja in obveščanje o nenavadnih dogodkih.

Za gradnjo aplikacije smo uporabili odprtokodni programski jezik PHP (PHP Hypertext Preprocessor) s priljubljenim razvojnim ogrodjem Symfony.

Ogrodje je uporabljeno za zaledni del aplikacije (ang. Backend) in se izvaja na strežniku Apache. Podatke shranjujemo v relacijski podatkovni bazi MySQL.

Čelni del aplikacije (ang. Frontend) smo zgradili s pomočjo popularnega ogrodja Bootstrap, ki zajema oblikovni jezik CSS (Cascading Style Sheets) in JS (JavaScript). Na ta način smo razvili interaktivno aplikacijo tako za namizne in mobilne naprave. Sestavljajo jo naslednje funkcionalne enote:

- **Vstopna stran** za hiter pregled meritev.
- **Podatki senzorja z grafično predstavitevijo** za podrobnejši pregled.
- **Primerjalnik** za primerjavo dveh različnih sistemov, spremenljivk ali meritev.
- **Administracija** za upravljanje senzorskega sistema.
- **Napovedovanje dobe uporabnosti** iz podatkov o izmerjenih temperaturah senzorskega sistema.
- **Obvestila** o nenavadnih oz. odstopajočih meritvah.

3.6.1 Vmesnik API

Vmesnik API (Application Programming Interface) je del spletne aplikacije, ki skrbi za povezavo s senzorskim sistemom. Omogoča konfiguracijo naprave in pošiljanje podatkov v spletno aplikacijo oz. sprejemanje podatkov iz mikrokrmilnika. Vmesnik API je torej nepogrešljiv del celovitega senzorskega sistema za zajem meritev v realnem času in analizo podatkov. Za delovanje ima odprte tri spletne naslove: prvi je namenjen konfiguraciji, drugi pošiljanju meritev, tretji pa pošiljanju alarmnih dogodkov ob pojavu napak ali zaznavanju neustreznih vrednosti v hladni verigi.

Naprave se na vmesnik povezujejo preko protokola HTTP. Za uspešno komunikacijo se morajo predstaviti s serijsko številko in ključi vmesnika. Podatke lahko pridobijo le naprave, katerih serijske številke so znane spletni

aplikaciji. Podobno tudi vmesnik sprejema le podatke naprav, ki se predstavijo z znanimi ključi. Neuspešen poskus pridobitve podatkov ali pošiljanja meritev zabeleži kot napako in je zabeležena v administraciji aplikacije.

Vmesnik API skrbi za zapisovanje meritev v podatkovno bazo. Prejeti meritvi pripiše čas, identifikacijsko številko eksperimenta in spremenljivke ter vse shrani v bazo. Način shranjevanja meritev je opisan v poglavju 3.5.

3.6.2 Vstopna stran

Vstopna stran spletne aplikacije prikazuje seznam vseh senzorskih sistemov z informacijami o testiranju. Podani zapisi so: ime naprave, opis, način delovanja, interval vzorčenja in ime eksperimenta. V nadaljevanju sledi tabela, ki za vsak senzor vsebuje tip senzorja, čas in vrednost zadnje meritve.

Vstopna stran ponuja tudi možnost izvoza vseh meritev izbrane naprave v datoteko CSV (Comma-separated values). Na dnu strani se nahaja meni, ki vsebuje povezave do funkcionalnih enot spletne aplikacije: primerjalnik, administracija in napovedovanje dobe uporabnosti.

3.6.3 Podatki senzorja

Povezave na imenih posameznega senzorja na vstopni strani nas vodijo na podstran s podrobnejšimi podatki. Ob vstopu se nam prikažejo podatki zadnjega sklopa meritev za eksperimente, katere lahko sicer izberemo v spustnem meniju. Zgornji del vsebuje tabelarni prikaz statističnih podatkov: čas zadnje meritve, zadnjo vrednost, število vseh meritev, najmanjšo, največjo in povprečno vrednost, standardni odklon ter enačbo za preračunavanje meritev pri senzorjih, ki vračajo surove podatke. Tu se nahaja tudi interaktivni graf za vizualizacijo meritev, ki lahko vsebuje dodatno serijo podatkov. Ta predstavlja preračunane surove podatke; pri temperaturnem senzorju (SS-TH) pa grafični prikaz za napoved dobe uporabnosti.

Spodnji del strani prikazuje tabelo meritev s podatki: čas meritve in vrednost. Administratorjem ponuja možnost vnosa referenčnih meritev (čas

in vrednost) ter dodajanje opomb (dogodkov) tekom eksperimenta, ki so na grafu prikazane kot navpične črte.

Zajete meritve izbranega eksperimenta lahko s klikom na gumb CSV prenesemo v obliki datoteke CSV, s klikom na gumb “natisni” pa jih izvozimo za nadaljnjo uporabo.

3.6.4 Primerjalnik

Primerjalnik je namenjen hkratnemu prikazu dveh različnih spremenljivk. Stran ponudi obrazec za izbiro meritev in njenih spremenljivk ter nekaj dodatnih opcij za prikaz na grafu: način prikaza, preračunavanje meritev in filtriranje meritev. Namen funkcionalnosti je ugotavljanje pravilnosti delovanja sistemov, ki so nameščeni v istem okolju. S prikazom podatkov na grafu lahko hitro ugotovimo nepravilnosti oz. neskladje.

Z vklopom funkcije “Odstrani špice (3-sigma)” podatkom odstranimo odstopajoče vrednosti [40]. Metoda 3-sigma deluje tako, da izračuna povprečje in standardni odklon meritev. Vse, ki od povprečja odstopajo več kot tri standardne odklone, so odstranjene iz prikazovanja na grafu.

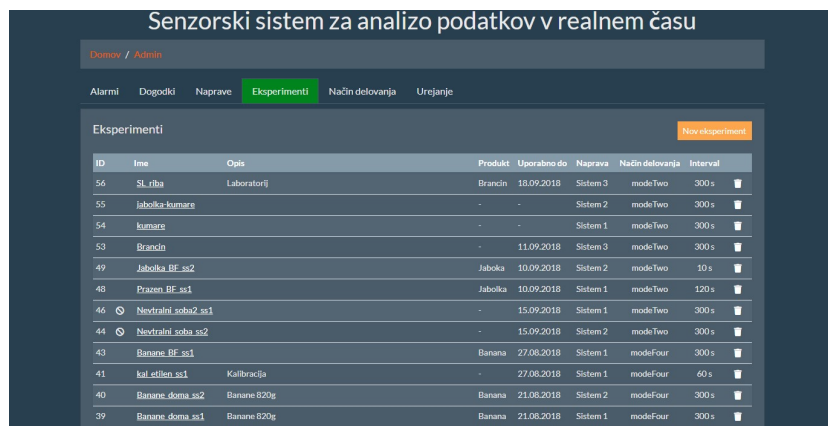
Primerjalnik omogoča preračunavanje meritev v vrednosti z realnimi enotami. Opcija na podlagi formule, pridobljene na osnovi kalibracije, pretvori podatke in jim pripiše standardno enoto (% , ppm, °C). Vklopimo jo z opcijo “Preračunaj”.

Različno izhodišče meritev izbranih spremenljivk spremeni resolucijo grafa in s tem pokvari vizualizacijo. Podatke izbranih spremenljivk lahko prikažemo na različnih oseh y in tako ohranimo dobro resolucijo. Funkcijo vklopimo z opcijo “Ena os Y”.

3.6.5 Administracija

Administracija je del spletne aplikacije, ki omogoča podroben pregled in upravljanje senzorskih sistemov: alarmi, dogodki, naprave, eksperimenti, načini delovanja in korekcija meritev. Do administracije lahko dostopajo samo re-

gistrirani uporabniki (Slika 3.6).



Senzorski sistem za analizo podatkov v realnem času

Domov / Admin

Alarmi Dogodki Naprave **Eksperimenti** Način delovanja Urejanje

Eksperimenti Nov eksperiment

ID	Ime	Opis	Produkt	Uporabno do	Naprava	Način delovanja	Interval
56	SL_riba	Laboratorij	Brancin	18.09.2018	Sistem 3	modeTwo	300 s
55	Jabolka-kumare		-	-	Sistem 2	modeTwo	300 s
54	kumars		-	-	Sistem 1	modeTwo	300 s
53	Brancin		-	11.09.2018	Sistem 3	modeTwo	300 s
49	Jabolka_BF_ss2		Jabolka	10.09.2018	Sistem 2	modeTwo	10 s
48	Prazni_BF_ss1		Jabolka	10.09.2018	Sistem 1	modeTwo	120 s
46	Neutralni_soba2_ss1		-	15.09.2018	Sistem 1	modeTwo	300 s
44	Neutralni_soba_ss2		-	15.09.2018	Sistem 2	modeTwo	300 s
43	Banane_BF_ss1		Banana	27.08.2018	Sistem 1	modeFour	300 s
41	kal_sfilen_ss1	Kalibracija	-	27.08.2018	Sistem 1	modeFour	60 s
40	Banane_doma_ss2	Banane 820g	Banana	21.08.2018	Sistem 2	modeFour	300 s
39	Banane_doma_ss1	Banane 820g	Banana	21.08.2018	Sistem 1	modeFour	300 s

Slika 3.6: Administracija spletne aplikacije.

Alarmi

Seznam napak v delovanju sistema lahko pregledujemo v zavihku alarmi. V primeru nepravilnega ali nepopolnega delovanja sistema, zaznamo težavo in ustvarimo obvestilo. Težave, ki jih sistem zaznava, so nedelujoče komponente, napačen format podatkov, neprepoznane naprave in neprepoznana konfiguracija sistema.

Dogodki in obvestila

Poleg spremljanja napak v delovanju sistema lahko dodamo tudi svoje dogodke. Uporabniško nastavljeni dogodki pri odstopajočih vrednostih pošiljajo obvestila na izbran elektronski naslov, kar omogoča hitro odpravo napak v sistemu ali v okolju, kjer se senzorski sistem nahaja.

Naprave

Administracija omogoča vpogled v seznam vseh naprav s podrobnostmi: ID, ime, opis, žeton in ključ. Tu lahko naprave dodajamo, urejamo in brišemo.

Eksperimenti

Ključna funkcionalnost administracije je upravljanje eksperimentov, ki hkrati omogoča tudi podroben pregled: ID, ime, opis, produkt testiranja, rok uporabe, ime naprave, način delovanja in interval vzorčenja. Tu lahko posamezen eksperiment tudi skrijemo ali izbrišemo.

Načini delovanja

Senzorski sistemi imajo predpripravljenih 6 načinov delovanja, ki jih lahko pregledujemo v administraciji. Načini delovanja so opisani v poglavju 3.4.

Korekcija meritev

Med izvajanjem meritev se včasih zgodi, da vrednosti temperature in vlage v kratkem času močno nihajo. S funkcijo korekcije lahko nihajoče meritve posameznega eksperimenta nadomestimo s srednjimi vrednostmi.

3.6.6 Napovedovanje dobe uporabnosti

Funkcionalnost na podlagi zajetih podatkov sproti izračunava dobo uporabnosti za ribe. Temelji na modelu, ki so ga na podlagi večletnih raziskav razvili v avstralski organizaciji CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) [30], s prilagoditvijo za napovedovanje dobe uporabnosti v realnem času. Avtorji potrjujejo, da je model, kljub svoji preprostosti, dovolj natančen in uporaben tudi za druga podobna živila.

Doba uporabnosti je najprej določena s strani proizvajalca oz. prodajalca ribe, nato pa ob vsaki meritvi izračunamo novo. Algoritem kot vhod sprejme podatek o temperaturi, zadnjo izračunano dobo uporabnosti ("SLref") in čas izpostavljenosti podani temperaturi ("time"), vrne pa število dni, ki jih odštejmo od zadnje izračunane dobe uporabnosti:

```
function CSIRO_realTime (temperature, SLref, time):  
    var SL = SLref  
    var k = Power((1+temperature * 0.1), 2);  
    SL -= k * time;  
  
    return SL;
```

Preostalo dobo uporabnosti predstavimo na grafu v spletni aplikaciji in in pod njim izpisujemo v obliki semaforja, kot ga prikazuje slika 3.7.



Slika 3.7: Semafor za prikaz dobe uporabnosti, ko je živilo še uporabno (zeleno) in že pokvarjeno (rdeče).

3.6.7 Obvestila

Spletna aplikacija vsebuje funkcionalnost, ki uporabnike obvešča o odstopajočih vrednosti senzorjev. Omogoča določanje pravil, na podlagi katerih se sproži pošiljanje e-mail obvestil. Pravila in naslov za obveščanje lahko v administraciji definira prijavljen uporabnik.

V sklopu napovedovanja dobe uporabnosti aplikacija samodejno pošlje obvestila o iztekajoči se dobi. Pošiljanje obvestil se prične 3 dni pred potekom roka in nato še vsak dan enkrat vse do izteka dobe uporabnosti.

Funkcionalnost omogoča stalen nadzor nad dogajanjem v hladni verigi in pravočasno ukrepanje ob zaznanih težavah. S pravočasnim ukrepanjem lahko preprečimo kvarjenje izdelka in ohranimo predpisano dobo uporabnosti.

3.7 Delovanje sistema

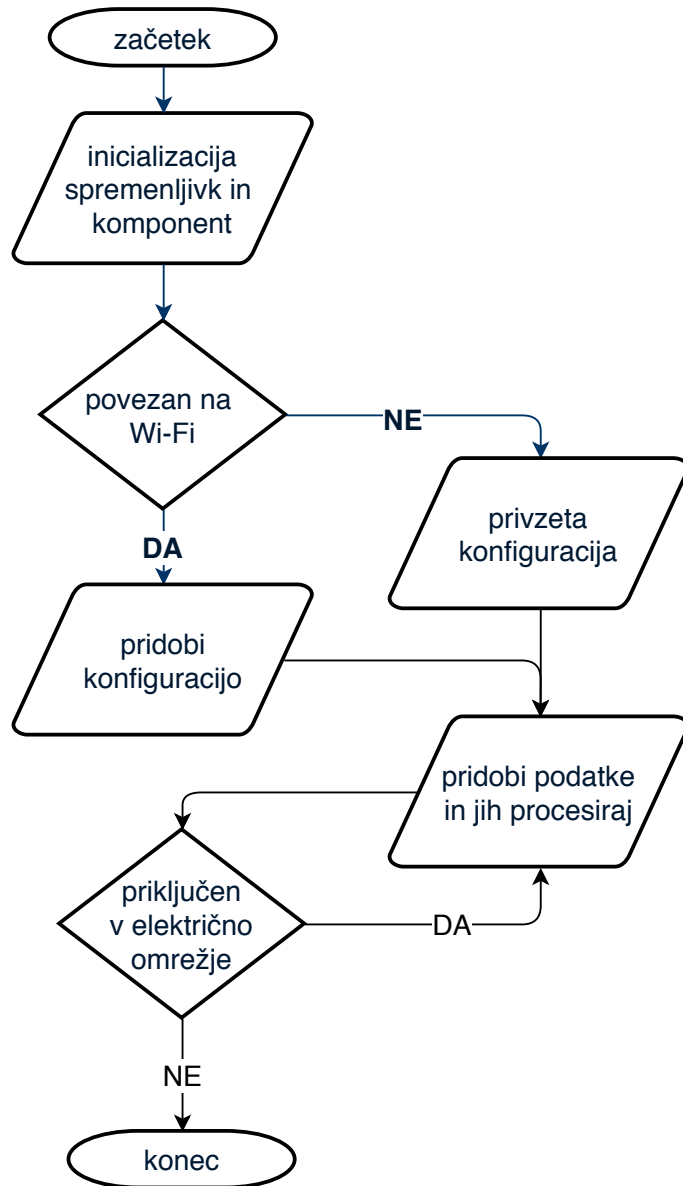
Senzorski sistem sestavljata strojna oprema in spletna aplikacija. Stroji del je realiziran na tiskanem vezju in vsebuje senzorje, mikrokrmilnik, analogno-digitalni pretvornik, modul za spominsko kartico in napajalnik. Spletna aplikacija predstavlja podporni del senzorskega sistema in omogoča tako konfiguracijo kot tudi nadzor sistema in vizualizacijo podatkov.

3.7.1 Strojna programska oprema

Na mikrokrmilniku teče program, ki je odgovoren za delovanje senzorskega sistema. Skrbi za inicializacijo vseh spremenljivk in komponent, povezovanje in komunikacijo z Wi-Fi omrežjem ter branje senzorskih podatkov in njihovo obdelavo. Napisan je v programskem jeziku C, na mikrokrmilnik pa ga naložimo z razvojnim orodjem Arduino IDE. Program sestavljajo trije deli:

1. Vključitev knjižnic, definicija spremenljivk s privzetimi vrednostmi in definicija načinov delovanja senzorskega sistema (ang. `init`).
2. Povezovanje v Wi-Fi omrežje, pridobitev časa UTC in konfiguracije ter inicializacija komponent: A/D pretvornika, senzorja za temperaturo in vlago ter modula za spominsko kartico (ang. `setup`).
3. Izvajanje meritev glede na interval vzorčenja in način delovanja (ang. `loop`).

Diagram poteka (Slika 3.8) prikazuje delovanje programa. Po inicializaciji spremenljivk in komponent se sistem poskuša povezati na omrežje Wi-Fi. Če je povezava uspešna, pridobi konfiguracijo, ki smo jo definirali ob kreiranju novega eksperimenta, sicer pa uporabi privzeto, tako kot je definirano v strojni programski opremi. Glede na konfiguracijo se prične izvajanje zanke, kjer v izbranem intervalu preberemo podatke senzorjev in jih obdelamo. Zanka se izvaja dokler je senzorski sistem priključen v električno omrežje.



Slika 3.8: Delovanje programa na senzorskem sistemu.

3.7.2 Konfiguracija in uporaba senzorskega sistema

Uporabniška konfiguracija senzorskega sistema je odvisna od omrežja Wi-Fi, saj se prenese ob prvi vzpostavitvi povezave. V nasprotnem primeru senzorski sistem preklopi v privzet način delovanja. Vzpostavitev delovanja senzorskega sistema sestoji iz treh korakov:

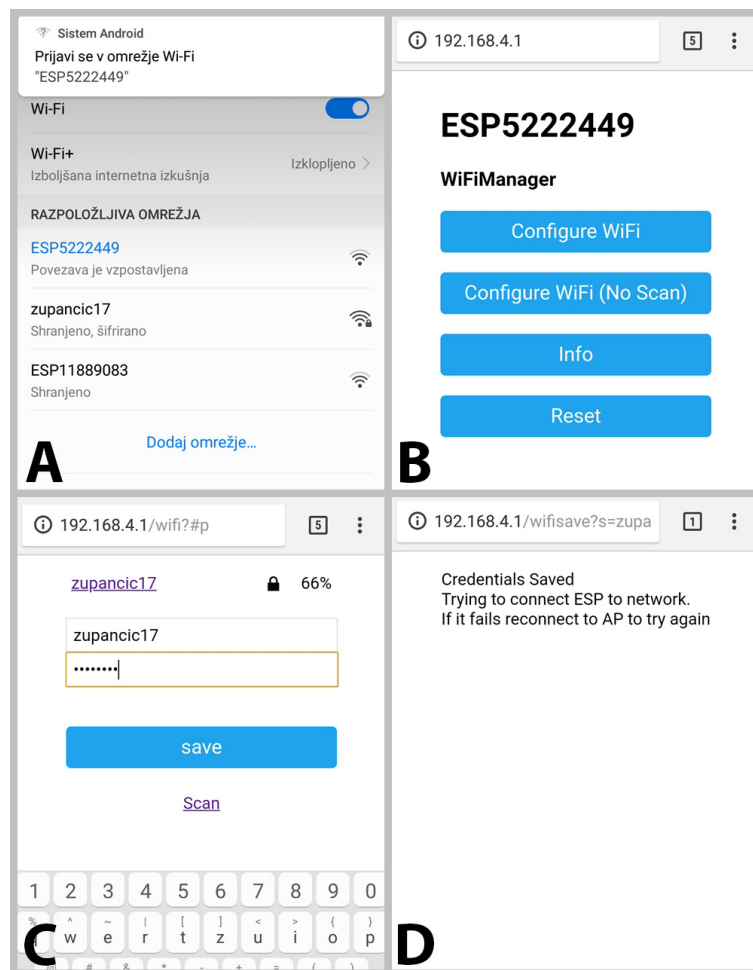
1. **Konfiguracija** se določi v administraciji spletne aplikacije tako, da dodamo nov eksperiment. Vpišemo naslov eksperimenta, izberemo napravo, dodamo opis, izberemo način delovanja in interval vzorčenja. Vpišemo lahko tudi ime produkta, ki ga testiramo in njegovo dobo uporabnosti. Po uspešnem dodajanju eksperimenta je konfiguracija končana.
2. **Namestitev senzorskega sistema** na zeleno mesto in **priklop v električno omrežje**.
3. **Vzpostavitev Wi-Fi povezave** s senzorskim sistemom. Po priklopu v električno omrežje senzorski sistem prične oddajati Wi-Fi omrežje na katerega se povežemo z računalnikom ali pametnim telefonom. Samodejno se odpre okno za konfiguracijo, kamor vpišemo podatke za povezavo senzorskega sistema v omrežje Wi-Fi (Slika 3.9).

Po uspešnem vpisu podatkov se naprava poveže s spletno aplikacijo in prenese konfiguracijo. Zajem meritev se prične samodejno, prve meritve pa so vidne že po nekaj sekundah. Ob neuspešni povezavi program vsakih 5 minut zapisuje meritve na spominsko kartico. Če spominska kartica ni vstavljena, potem sistem ne deluje.

Pri ustvarjanju eksperimenta lahko izberemo način, kjer meritve zapisujemo samo na spominsko kartico ali jih hkrati zapisujemo in pošiljamo. Tedaj je nujno potrebna prisotnost spominske kartice. Ob inicializaciji programa se na njej ustvari datoteka CSV z imenom eksperimenta, v katero zapisujemo meritve. Način zapisovanja meritev je predstavljen v poglavju 3.5.

Eksperiment zaključimo tako, da napravo izklopimo iz električnega omrežja. Tedaj se meritve ne izvajajo več. Zajete meritve so shranjene tam, kjer

smo določili v prvem koraku konfiguracije: na spominski kartici, v podatkovni bazi spletne aplikacije ali na obeh mestih hkrati. Ob prekinitvi napajanja senzorskega sistema izgubimo tudi podatke o omrežju Wi-Fi, zato je pri naslednji priključitvi sistema v električno omrežje potrebno ponovno vzpostaviti povezavo (korak 3).



Slika 3.9: Koraki vzpostavitve Wi-Fi povezave na senzorskem sistemu preko mobilnega telefona (A – zahteva za prijavo, B – konfiguracijski meni v brskalniku, C – vpis podatkov o omrežju, D – shranjevanje).

Poglavje 4

Kalibracija in testiranje

4.1 Kalibracija

Plinski senzorji morajo biti umerjeni in periodično testirani, s čimer je zagotovljeno natančno in pravilno delovanje. Način in pogostost kalibracije definira proizvajalec glede na tip senzorja. Senzorje je priporočeno spremljati prvih 30 dni po namestitvi v delovno okolje [20]. Po tem časovnem obdobju pa se priporočajo mesečni intervali kalibracije. Postopek je potrebno definirati tako, da je enostaven za izvedbo, ekonomičen, ponovljiv in sledljiv v tistem okolju, kjer je senzor nameščen. Umerjanje plinskih senzorjev poteka v dveh korakih. Najprej nastavimo ničelno točko, nato pa izvedemo kalibracijo z znano koncentracijo plina.

4.1.1 Določanje ničelne točke

Določanje ničelne točke predstavlja precejšnjo težavo, saj ni predpisanih standardov. Pri nekaterih postopkih se uporablja čisti dušik, pri drugih pa sintetična mešanica zraka. Razlog za to so lahko dostopne ustekleničene plinske mešanice. Primerna ničelna točka je čisti zrak, ki ga npr. najdemo v pisarni [20]. Slednji bo pri umerjanju pokazal dovolj realistične rezultate.

Ob upoštevanju navodil proizvajalca ter vseh dejavnikov umerjanja se uporabljata naslednja dva postopka:

1. Senzor izpostavimo čistemu zraku in vzorčimo nekaj minut oz. toliko časa, kot je potrebno za stabilizacijo senzorja.
2. Zrak lahko privedemo do senzorja tudi v stisnjeni obliki v jeklenki. Slednji ima zelo nizko vlažnost in sledi drugih plinov, zato ga senzorju dovajamo preko filtrov in vlažilca zraka.

4.1.2 Umerjanje pri znani koncentraciji

Umerjanje območja delovanja senzorja je lahko enostaven ali zelo zapleten in drag postopek [20]. Vse je odvisno od plina in njegove koncentracije. Za najboljše rezultate je potrebna znana mešanica ciljnega plina. Postopek običajno zahteva tudi usposobljenost operaterjev. Najbolj pogoste metode so:

1. Umerjanje se izvede s pripravljeno plinsko mešanico, ki jo iz visokotlačne jeklenke doziramo senzorju. Vseh mešanic ni mogoče narediti vnaprej, saj imajo zaradi kemijskih reakcij omejeno dobo uporabnosti.
2. Umerjanje lahko izvedemo tudi s permeacijsko ampulo. To je zaprta posoda, ki vsebuje kemikalije v tekočem stanju in jih prepušča skozi vgrajeno membrano. Hlapi predstavljajo stabilno plinsko mešanico, s katero umerimo senzor.
3. Metoda križnega umerjanja izkorišča dejstvo, da je posamezen plinski senzor lahko moten z drugimi plini. Kalibracijo izvedemo z drugim plinom, ki je bolj stabilen, cenejši in varnejši, odziv na pravi plin pa nato preračunamo.
4. Senzorji so namenjeni različnim plinskim mešanicam in zato za kalibracijo potrebujemo različne pline, ki niso vedno na voljo v pravih koncentracijah. Za umerjanje najprej sestavimo svojo plinsko mešanico, nato pa preračunamo odziv senzorja.

4.1.3 Kalibracija kromatografa

Referenčne meritve etilena smo pridobili s plinskim kromatografom Agilent technologies 6890N [3], katerega delovanje smo preverili pred pričetkom izvajanja meritev.

Postopek

V kozarec prostornine 2500 ml smo vbrizgali 0,25 ml etilena s koncentracijo 95 %. Plinska mešanica, ki nastane, vsebuje 95 ppm etilena. Vsebino kozarca smo po eni uri preverili s kromatografom, nato pa kozarec izpraznili in postopek ponovili.

Analiza

Postopek smo ponovili 6-krat in pri koncentraciji 95 ppm dobili povprečne meritve 86,7 enot (Tabela 4.1). Sledi, da 91,2 kromatografskih enot predstavlja 100 ppm. Ko kromatografske enote pomnožimo s faktorjem 1,1, dobimo vrednost koncentracije v ppm.

Število meritev	6
Meritve za 95 ppm [enot]	77,5; 78,0; 106,7; 85,0; 75,5; 97,2
Povprečje [enot]	86,7
Standardni odklon [enot]	11,5
Izračunana vrednost za 100 ppm [enot]	91,2
Faktor pretvorbe	1,1

Tabela 4.1: Podatki o eksperimentu.

Primer (1): $91,2 \text{ enot} * 1,1 = 100,3 \text{ ppm}$

Primer (2): $86,7 \text{ enot} * 1,1 = 95,3 \text{ ppm}$

4.1.4 Kalibracija senzorskega sistema

Kalibracija plinskih senzorjev je zahteven postopek, saj imamo opravka z različnimi kemijskimi snovmi. To zahteva posebno opremo in strokovno usposobljeno osebje. Kalibracijo smo izvedli s pomočjo plinskega analizatorja Echo [8] (kisik in ogljikov dioksid), medtem ko smo kalibracijo senzorja za etilen izvedli z vbrizgavanjem znane plinske mešanice. Referenčne meritve smo nato primerjali z meritvami senzorskega sistema. Izračunali smo regresijsko premico in tako določili formulo za pretvorbo senzorskih meritev v dejanske koncentracije za dva senzorska sistema (SS1, SS2), ki sta bila implementirana za testiranje.

Postopek

Kalibracijo izvajamo v kozarcu prostornine 2500 ml, in sicer za vsak plin posebej (etilen, kisik, ogljikov dioksid). Kozarec je prazen, na njem pa je privit pokrov z nameščenim senzorskim sistemom. Po tem, ko sistem pripravimo za delovanje, kalibracijo izvajamo po naslednjih korakih:

1. Določitev ničelne točke z zrakom v laboratoriju.
2. Vbrizganje plinske mešanice.
3. Odčitavanje senzorskih meritev.

Postopek za vsak sistem večkrat ponovimo in uporabimo povprečje. Nad meritvami izvedemo linearno regresijo, kjer pridobimo enačbe za pretvorbo senzorskih meritev na izhodu A/D pretvornika v koncentracijo plina (% ali ppm).

Etilen

Kalibracijo senzorja za etilen smo izvajali z vbrizgavanjem etilena. S pomočjo brizge zajamemo 0,25 ml plina, ki je pod tlakom shranjen v jeklenki in ga vbrizgamo v kozarec. Vrednosti senzorjev zabeležimo 15 minut po vbrizgu,

nato pa kozarec prezračimo in postopek ponovimo. Tabela 4.2 prikazuje meritve senzorja za etilen, enačbe za pretvorbo senzorskih meritev v koncentracijo etilena pa vsebuje Tabela 4.3.

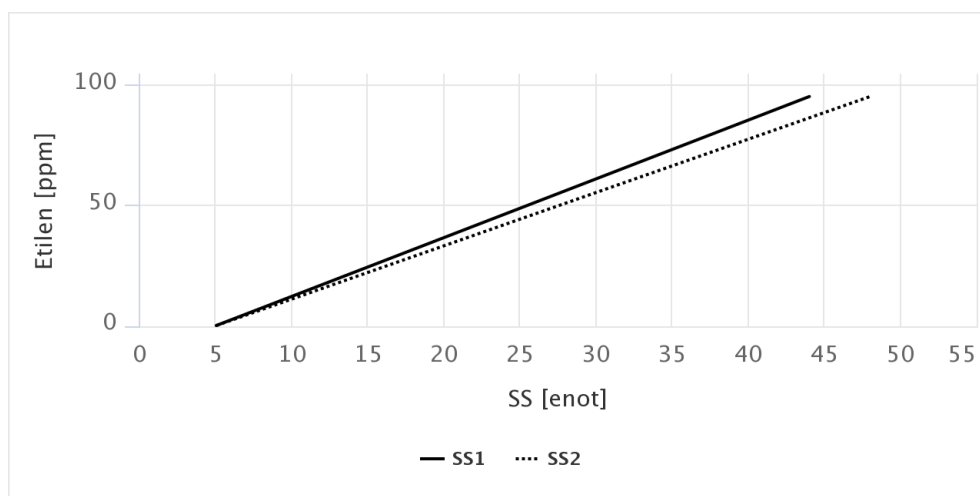
	SS1	SS2
Število meritev	3	3
Meritve za 95 ppm [enot]	37; 46; 49	45; 48; 51
Povprečje za 95 ppm [enot]	44	48
Ničelna vrednost [enot]	5	5
Standardni odklon [enot]	5	3

Tabela 4.2: Podatki kalibracije senzorja za etilen.

	SS1	SS2
Enačba za pretvorbo v ppm	$y = 2,4x - 12$	$y = 2,2x - 11$
Natančnost R^2	1,0	1,0

Tabela 4.3: Enačbe za pretvorbo senzorskih meritev na izhodu A/D pretvornika v koncentracijo etilena (%).

Slika 4.1 prikazuje primerjavo rezultatov pretvorbe senzorskih meritev v koncentracijo etilena. Oba sistema imata ničelno vrednost pri 5 senzorskih enotah, vrednost pri koncentraciji 100 ppm pa se razlikuje za 4 enote. Razliko opazimo v naklonu premic, kjer večji naklon pomeni manjšo resolucijo pri pretvorbi senzorskih meritev v ppm.



Slika 4.1: Primerjava rezultatov v SS1 in SS2 za pretvorbo senzorskih meritev na izhodu A/D pretvornika v koncentracijo etilena (ppm).

Ogljikov dioksid

Kalibracijo sensorja za ogljikov dioksid smo izvedli tako, da smo kozarec povezali s plinskim analizatorjem Echo, vanj pa vsaki 2 minuti vbrizgavali 0,5 ml ogljikovega dioksida. Sproti smo beležili odziv sensorja in izmerjene vrednosti analizatorja (Tabela 4.4), nato pa z linearno regresijo določili pretvorbo senzorskih enot v odstotke (Tabela 4.5).

Plinski analizator [%]	SS1[enot]	SS2[enot]
0,1	104	113
0,5	80	89
0,8	70	79
1,0	63	72
1,1	59	68

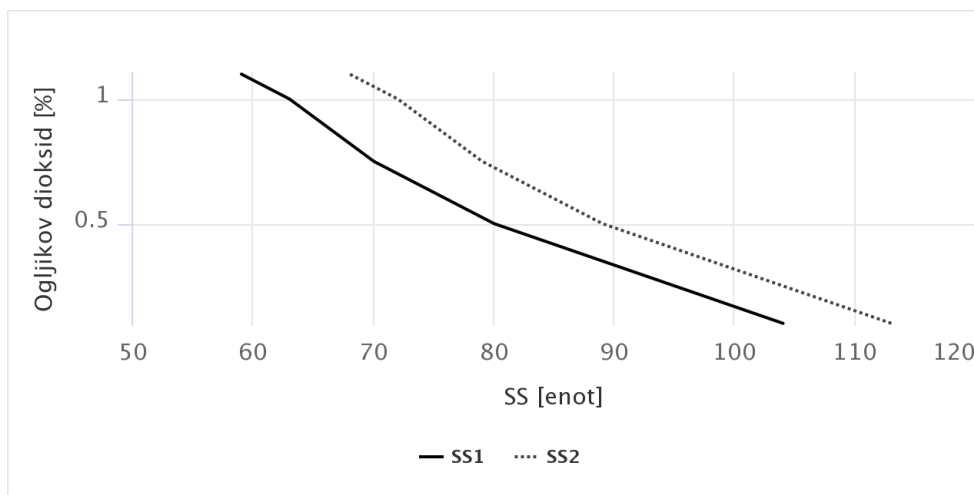
Tabela 4.4: Kalibracija sensorja za ogljikov dioksid.

Slika 4.2 prikazuje primerjavo rezultatov pretvorbe senzorskih meritev v

	SS1	SS2
Enačba za pretvorbo v %	$y = -0,02344x + 2,4729$	$y = -0,02344x + 2,6838$
Natančnost R^2	0,956	0,956

Tabela 4.5: Enačbe za pretvorbo senzorskih meritev na izhodu A/D pretvornika v koncentracijo ogljikovega dioksida (%).

koncentracijo ogljikovega dioksida. Opazimo, da so senzorske enote obratne glede na koncentracijo: višja kot je koncentracija, manjša je vrednost senzorjev. Senzorja imata različno ničelno vrednost, medtem ko je trend premice enak.



Slika 4.2: Primerjava rezultatov v SS1 in SS2 pretvorbe senzorskih meritev na izhodu A/D pretvornika v koncentracijo ogljikovega dioksida (%).

Kisik

Kalibracijo senzorja za kisik izvedemo tako, da zrak v kozarcu nadomestimo z dušikom. Kozarec nato povežemo s plinskim analizatorjem Echo in merimo koncentracijo kisika. Istočasno beležimo tudi meritve senzorja (Tabeli 4.6 in 4.7), nato pa z linearno regresijo določimo enačbi za pretvorbo senzorskih meritev v odstotke (Tabela 4.8).

Plinski analizator [%]	SS1 [enot]
4,5	185
5	195
20,1	872

Tabela 4.6: Kalibracija senzorja za kisik (SS1).

Plinski analizator [%]	SS2 [enot]
5,2	173
5,6	190
20,1	757

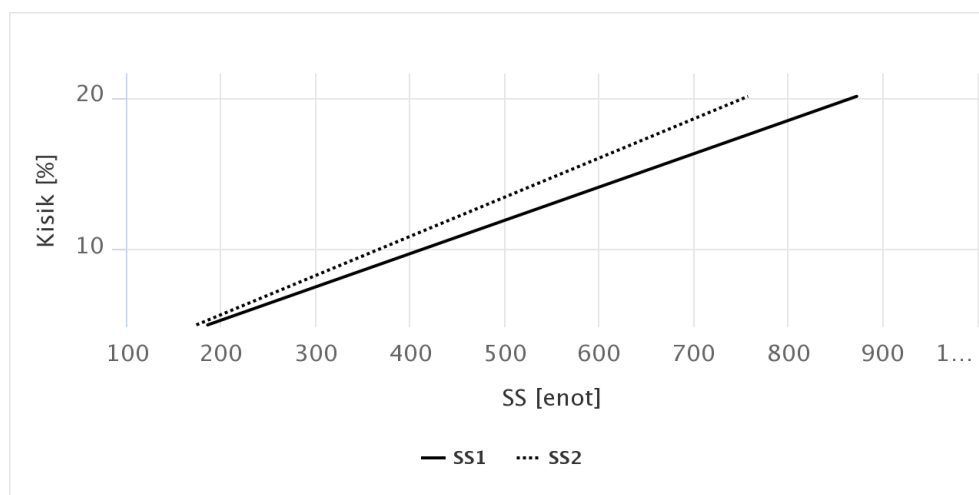
Tabela 4.7: Kalibracija senzorja za kisik (SS2).

	SS1	SS2
Enačba za pretvorbo v %	$y = 0,0225x + 0,472$	$y = 0,0225x + 0,764$
Natančnost R_2	0,99	0,99

Tabela 4.8: Enačbe za pretvorbo senzorskih meritev na izhodu A/D pretvornika v koncentracijo kisika (%).

Slika 4.3 prikazuje primerjavo rezultatov za pretvorbo senzorskih meritev v koncentracijo kisika. Ničelna točka v nevtralnih pogojih se razlikuje

za 115 enot, medtem ko je vrednost senzorjev pri koncentraciji 5 % skoraj enaka. Razliko opazimo v naklonu premic, kjer večji naklon pomeni manjšo resolucijo pri pretvorbi senzorskih meritev v ppm.



Slika 4.3: Primerjava rezultatov v SS1 in SS2 pretvorbe senzorskih meritev na izhodu A/D pretvornika v koncentracijo kisika (%).

Kalibracijo senzorja za temperaturo in relativno vlažnost nismo izvedli, saj proizvajalec navaja, da meritve že predstavljajo dejanske vrednosti. Prav tako nismo izvedli kalibracijo senzorja za svetlobo, saj nismo imeli ustrezne opreme.

4.2 Delovanje senzorskega sistema v sobi

Testiranje je potekalo pri sobnih pogojih in je bilo namenjeno ugotavljanju delovanja vseh funkcij ter odzivnosti sistema. Posamezni testi so trajali od 24 do 72 ur, s katerim smo v realnem času spremljali vse senzorske podatke. Meritve smo na podlagi formule, pridobljene v kalibracijskem postopku, preračunali v dejanske. Ugotovili smo, da sta oba senzorska sistema stabilna in vračata primerljive podatke, ki se razlikujejo le zaradi odstopanj senzorjev.

Delovanje senzorskega sistema smo najprej preverili z nevtralnimi testi, s čimer smo določili tudi ničelne točke plinskih senzorjev. Sistem smo izpostavili nevtralnemu pogoju, tj. čistemu zraku v sobi z rahlo odprtim oknom. Podatki o izvedbi eksperimenta so predstavljeni v Tabeli 4.9, statistika meritev pa v Tabeli 4.10.

Eksperiment je bil namenoma zasnovan z določenimi dogodki, da smo lahko ugotavljali odzivnost sistema:

1. Od 20:00 do 20:35 sta prisotni 2 osebi.
2. Od 20:35 do 2:50 je soba prazna.
3. Od 2:50 do 8:40 v sobi spi ena oseba.
4. Ob 8:35 odpremo okno za 10 minut in nato je soba prazna do 18:30.
5. Od 18:30 do 20:00 je v sobi ena oseba.

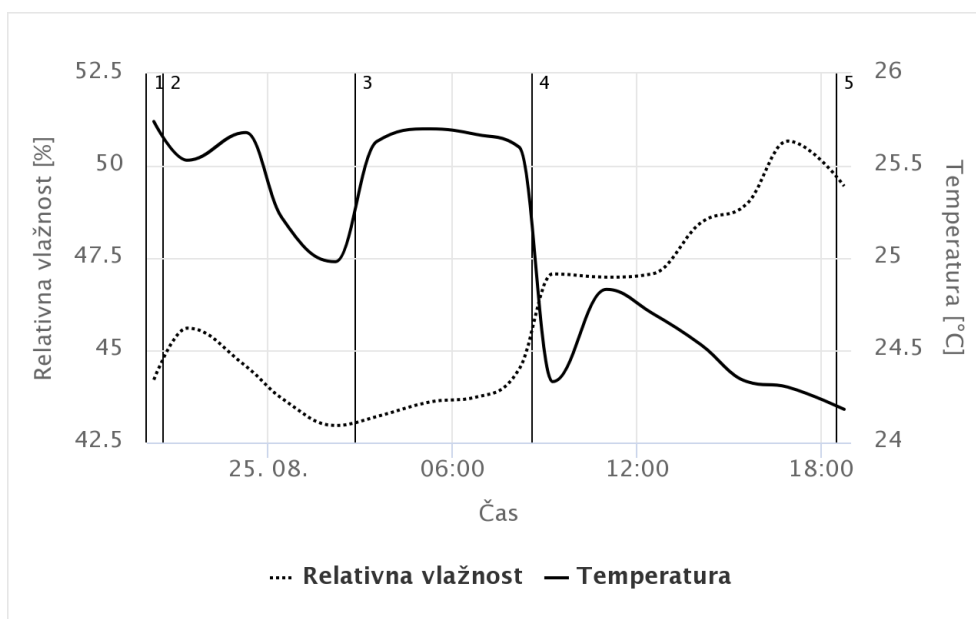
Začetek	24. 8. 2018 ob 20:00
Konec	25. 8. 2018 ob 20:00
Trajanje	24 ur
Interval vzorčenja	5 minut
Način delovanja	Posredovanje meritev na strežnik in zapisovanje na spominsko kartico
Velikost sobe	18 m ²

Tabela 4.9: Podatki o izvedbi eksperimenta.

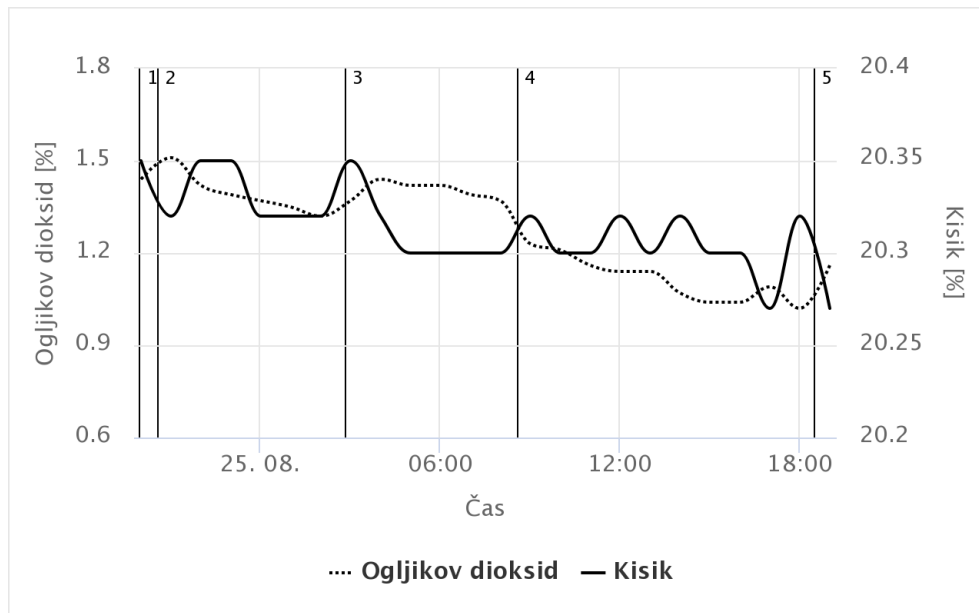
Slika 4.4 prikazuje gibanje temperature in zračne vlažnosti v sobi. Ob prisotnosti dveh oseb in takrat, ko je okno zaprto, zabeležimo višjo temperaturo in nižjo relativno vlažnost. Zjutraj za nekaj minut na stežaj odpremo okno. Soba se ohladi, hkrati pa naraste relativna vlažnost. Koncentracija kisika in

Senzor	Povprečje	Standardni odklon
Temperatura	25 °C	0,6 °C
Relativna vlažnost	46,2 %	2,4 %
Ogljikov dioksid	1,3 %	0,2 %
Kisik	20,3 %	0,8 %
Etilen	0 ppm	0 ppm
Svetloba (dan)	403 enot	193 enot
Svetloba (noč)	8 enot	1 enot

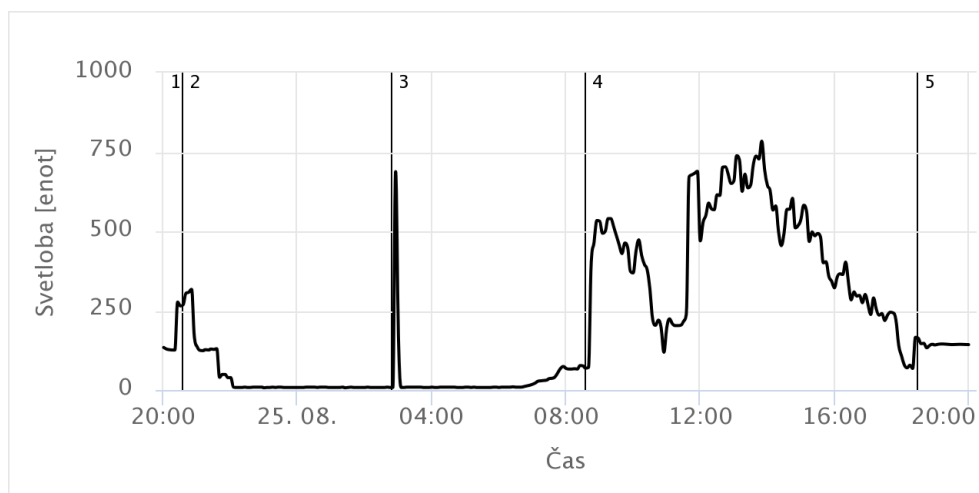
Tabela 4.10: Statistični podatki nevtralnega eksperimenta.



Slika 4.4: Temperatura in relativna vlažnost v sobi.



Slika 4.5: Kisik in ogljikov dioksid v sobi.



Slika 4.6: Svetloba v sobi.

ogljikovega dioksida je ves čas konstantna (Slika 4.5), senzor za svetlobo pa vrača nizke vrednosti ponoči in visoke podnevi (Slika 4.6).

Po analizi meritev posameznih količin ugotovimo, da senzorski sistem vrača smiselne vrednosti in je odziven na dogodke v njegovi bližini. Takšen sistem je primeren za izvedbo eksperimentov oz. meritev na področju hladne verige.

Poglavje 5

Eksperimenti

5.1 Hladna veriga in doba uporabnosti

Predpisan rok uporabe velja le tedaj, ko so upoštevana vsa navodila in postopki ravnanja s proizvodom. V nasprotnem primeru se le-ta predčasno pokvari in primorani smo ga zavreči. Uporabili smo SS-TH in preverjali meritve temperature in relativne vlažnosti kleti, kjer je shranjena družinska ozimnica, ter temperaturo sobe za napovedovanje preostale dobe uporabnosti ribe.

5.1.1 Klet

Domača klet predstavlja pomemben del hladne verige za shranjevanje ozimnice. V njej se nahajajo sveže sadje in zelenjava, vino in drugi vloženi plodovi. Z eksperimentom, ki je opisan v Tabeli 5.1, smo želeli preveriti spremembe temperature in relativne vlažnosti v povezavi z nastavitvami klimatske naprave.

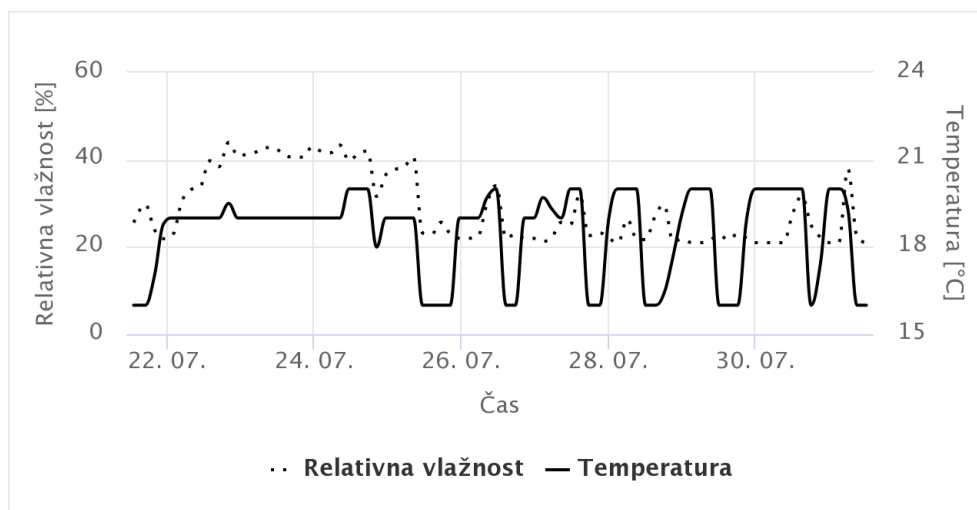
Slika 5.1 prikazuje senzorske meritve, statistične vrednosti za podatke pa so podane v Tabeli 5.2. Opazimo nihanje temperature med 15,3 °C in 21 °C, kar je posledica ročnega vklapljanja klime, ki je delovala samo v popoldanskem času, ko je sonce najmočnejše. Podobno nihanje opazimo tudi pri relativni vlažnosti, saj se med hlajenjem kleti zrak izsuši.

Začetek	21. 7. 2018 ob 13:00
Konec	31. 7. 2018 ob 13:00
Trajanje	10 dni
Interval vzorčenja	15 minut
Način delovanja	Posredovanje meritev na strežnik
Nastavljena temperatura klime	16 °C
Ohlajanje iz 20 °C na 16 °C	30 do 45 minut
Segrevanje iz 16 °C na 20 °C	4 ure

Tabela 5.1: Podatki o eksperimentu.

	Temperatura [°C]	Relativna vlažnost [%]
Povprečje	18,5	28,7
Standardni odklon	1,5	8,2
Minimum	15,3	21,0
Maksimum	21,0	45,5

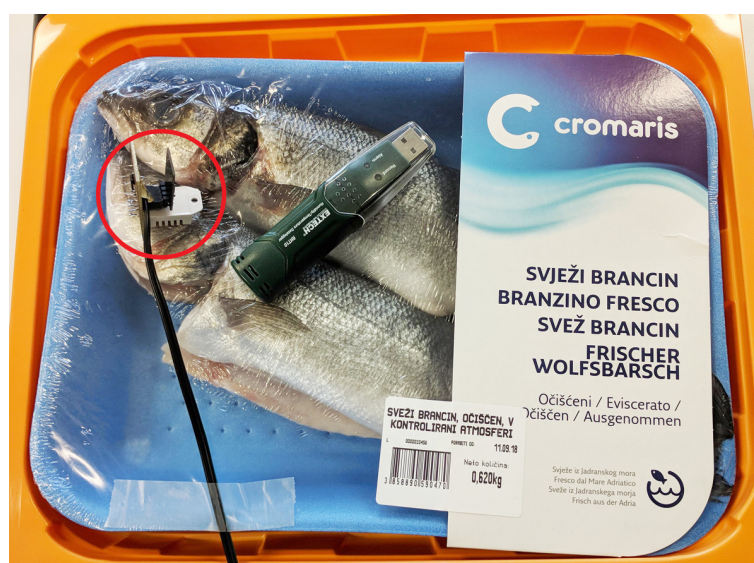
Tabela 5.2: Statistični podatki za temperaturo in relativno vlažnost v kleti.



Slika 5.1: Temperatura in relativna vlažnost v kleti za obdobje od 21. 7. do 31. 7. 2018.

5.1.2 Soba

S senzorskimi meritvami lahko dinamično napovedujemo dobo uporabnosti in živilo porabimo še preden se pokvari. Izvedli smo eksperiment z ribo, pri katerem smo v njeni neposredni bližini merili temperaturo in relativno vlažnost. Naš cilj je bil preveriti spreminjanje dobe uporabnosti na osnovi realnih podatkov v posebnih pogojih hranjenja, če ni možno izpolniti na živilu navedenih zahtev hladne verige.



Slika 5.2: Postavitev senzorjev temperature in relativne vlažnosti na embalažo z brancinom ob začetku eksperimenta.

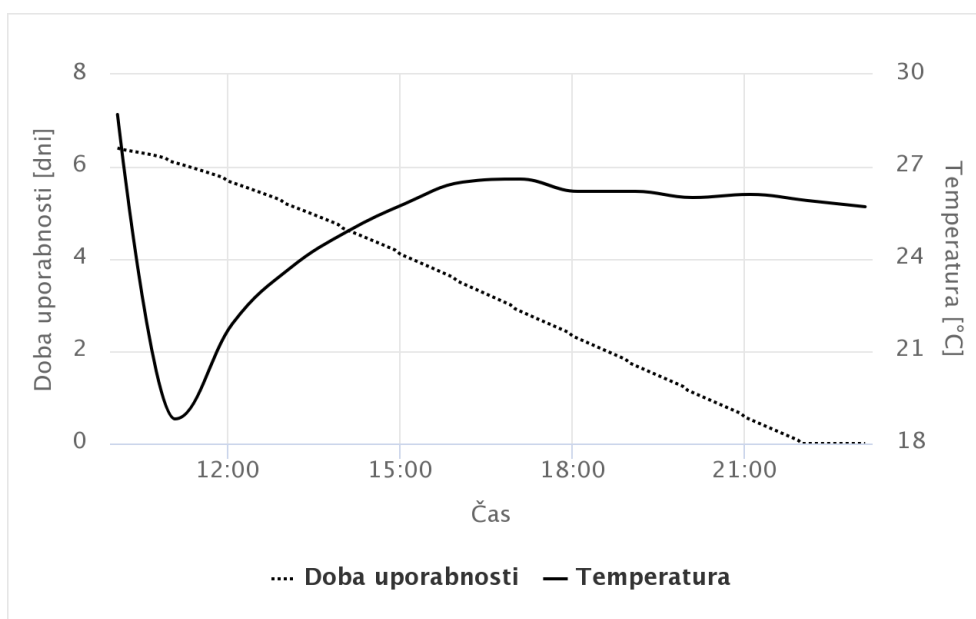
Preostalo dobo uporabnosti živila smo napovedovali z algoritmom CSIRO [37]. Nadgradili smo ga tako, da se ob vsaki zajeti meritvi izvede izračun in se rezultati predstavijo v spletni aplikaciji. Uporabili smo embalažo sveže pakiranega brancina, ki smo ga iz trgovine prinesli v hladilni torbi. Na embalažo smo namestili senzorski sistem in vse skupaj izpostavili sobni temperaturi (Slika 5.2). Vzporedno smo meritve preverjali tudi z rezultati, ki smo jih pridobili z zapisovalnikom podatkov Extech RHT10 [22]. Podrobnosti eksperimenta so predstavljene v Tabeli 5.3. Doba uporabnosti brancina je 8 dni, če ga hranimo na primerni temperaturi (0 °C). V našem primeru se je

ta doba ob nakupu zmanjšala in zato znašala samo še 6 dni. Dobo uporabnosti določimo tako, da od datuma, ki je podan na embalaži (Porabiti do), odštejemo datum nakupa (Začetek).

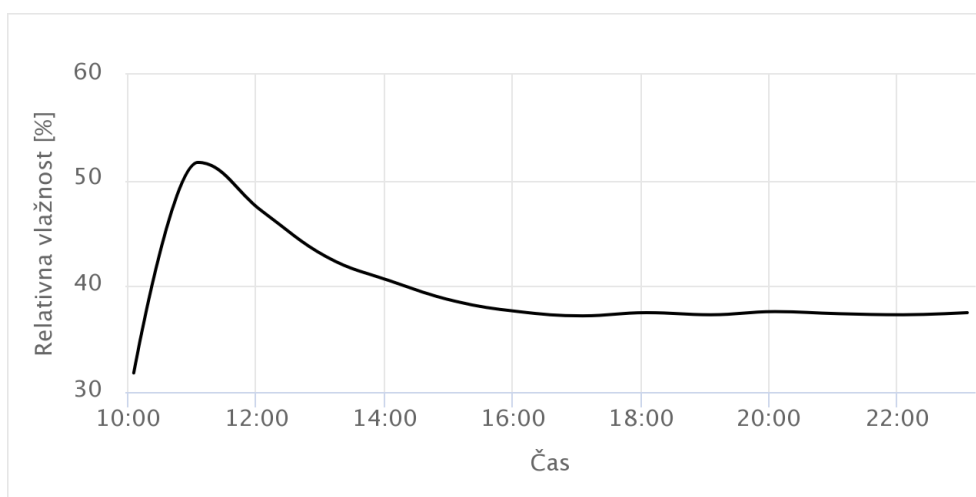
Začetek	5. 9. 2018 ob 10:00
Konec	5. 9. 2018 ob 23:00
Trajanje	13 ur
Interval vzorčenja	5 minut
Način delovanja	Posredovanje meritev na strežnik
Hraniti pri temperaturi	0 do 4 °C
Porabiti do	11. 9. 2018 (6 dni)
Začetna temperatura	12,6 °C
Povprečna temperatura	24,5 °C
Povprečna zračna vlažnost	40 %
Temperatura brancina doseže 25 °C	4 ure
Doba uporabnosti je potekla	5. 9. 2018 ob 22:00

Tabela 5.3: Podatki o eksperimentu.

Ko smo senzorski sistem položili na embalažo z ribo, se je temperatura zniža na 12,6 °C in se po 4-ih urah ponovno dvignila na sobno temperaturo. Takrat je bila izračunana doba uporabnosti samo še 4 dni (črtkana črta). Riba je ostala na povprečni temperaturi 25,9 °C, zato je doba uporabnosti strmo padala in potekla že isti dan ob 22:00 (Slika 5.3). Ob danih temperaturnih pogojih se je doba uporabnosti skrajšala iz 6 dni na 12 ur. Relativna vlažnost se je zaradi hladne in vlažne embalaže v začetku eksperimenta hitro povečala, nato pa je počasi padla in se ustali pri 38 % (Slika 5.4).



Slika 5.3: Napovedovanje preostale dobe uporabnosti brancina na sobni temperaturi v odvisnosti od posamezne meritve za podan interval vzorčenja.



Slika 5.4: Relativna vlažnost na embalaži ribe od postavitve na sobno temperaturo.

5.2 Zorenje sadja in zelenjave

Plinski senzorji, ki so vključeni v sistemih SS1 in SS2, so namenjeni zaznavanju sprememb pri zorenju in propadanju sadja in zelenjave. Senzorje smo uporabili na dva načina: v zaprtem kozarcu in v odprtem zaboju. V prvem primeru nas je zanimala koncentracija plinov, ki jih sproščajo banane in jabolka; v drugem primeru pa vpliv etilena na propadanje zelenjave v odvisnosti od etilena, ki ga proizvajajo jabolka. Osnovni cilj eksperimentov je bila analiza delovanja in pregled senzorskih meritev. Pri omenjenih procesih so nas zanimale spremembe kisika in ogljikovega dioksida ter tvorba etilena.

5.2.1 Banane

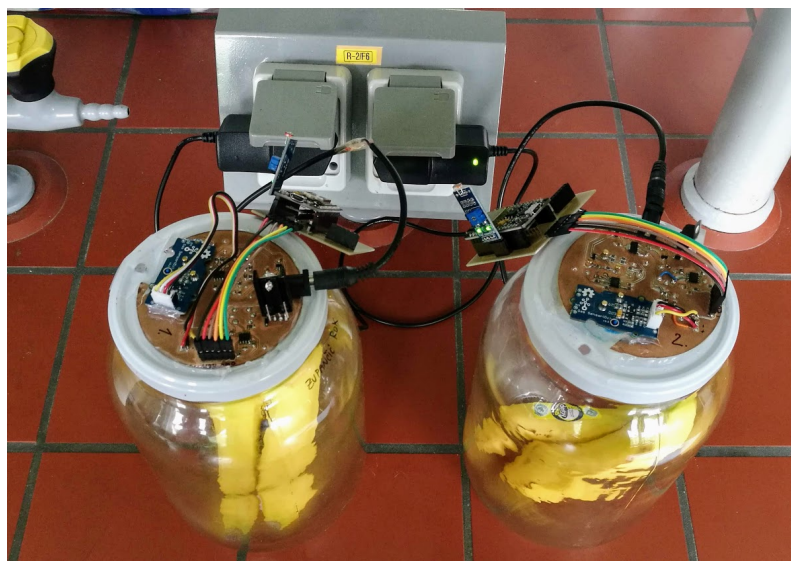
Zrele banane v nekaj dneh postanejo rjave, zato jih moramo zaužiti v zelo kratkem času. Zaradi dolge transportne poti uvažajo še zelene plodove, ki jih nato hranijo v zorilnicah, zorenje pa spodbudijo z etilenom. Kilogram naravno zorjenih banan prvi dan sprosti do 60 ppm etilena, medtem ko umetno zorjene sprostijo tudi preko 100 ppm. Sproščanje etilena se nato postopoma zmanjša in v tretjem dnevu zorenja pade pod 5 ppm [33].

S senzorskim sistemom smo izvedli eksperiment, pri katerem smo v zaprtem kozarcu opazovali meritve plinskih senzorjev za etilen, ogljikov dioksid in kisik. Podatki o eksperimentu se nahajajo v Tabeli 5.4.

Eksperiment smo izvajali na Biotehniški fakulteti, Oddelek za živilstvo. V steklen kozarec prostornine 2500ml smo položili 4 zrele banane in ga zaprli s pokrovom, na katerem so bili nameščeni senzorji (Slika 5.5). Testiranje je potekalo v laboratoriju na sobni temperaturi z dvema sistemoma (SS1, SS2). Tabela 5.5 vsebuje podatke o pogojih v kozarcu, ki so v določeni meri vplivali na zorenje banan, Slika 5.6 pa gibanje temperature in zračne vlažnosti.

Začetek	20. 8. 2018 ob 11:50
Dodatno zapiranje (1)	23. 8. 2018 ob 8:10
Prekinitev (2)	24. 8. 2018 ob 8:05
Nadaljevanje (3)	24. 8. 2018 ob 17:15
Konec	25. 8. 2018 ob 19:00
Trajanje	5 dni 7 ur
Interval vzorčenja	5 minut
Način delovanja	Posredovanje meritev na strežnik
Referenčne meritve	vsak dan ob 8:00 in 15:00 uri

Tabela 5.4: Podatki o eksperimentu.

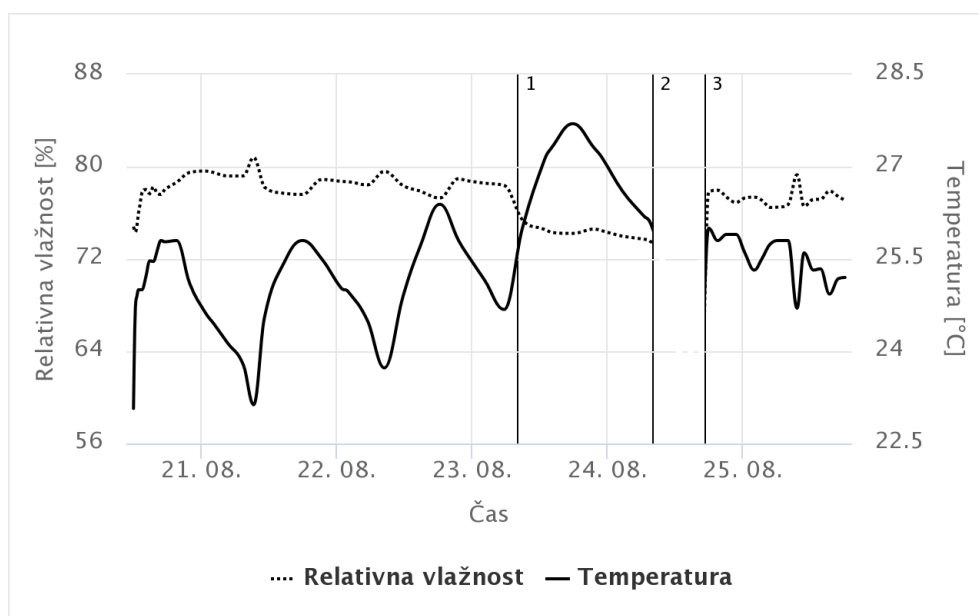


Slika 5.5: Spremljanje zorenja banan s senzorskim sistemom.

Za spremljanje tvorbe etilena smo 2-krat na dan s plinskim kromatografom izvajali referenčne meritve, da bi preverili na kakšen način lahko razložimo rezultate, ki jih dobimo s plinskimi senzorji. Meritve etilena s senzorskim sistemom, preračunane meritve in referenčne meritve so prikazane v Tabeli 5.6.

	Temperatura [°C]	Relativna vlažnost [%]
Povprečje	25,2	75,6
Standardni odklon [%]	1,1	5,7
Minimum	21,9	54,6
Maksimum	27,7	82,6

Tabela 5.5: Podatki o temperaturi in relativni vlažnosti v kozarcu z bananami.

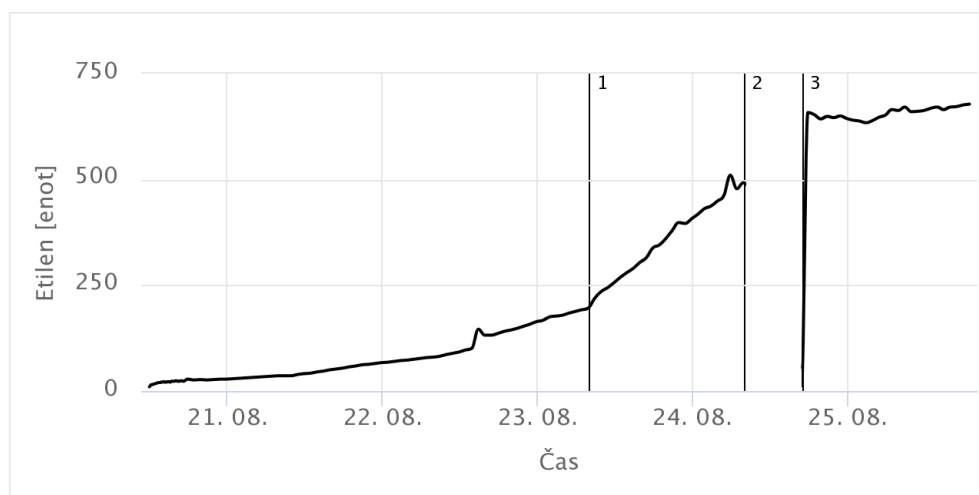


Slika 5.6: Gibanje temperature in relativne vlažnosti v kozarcu z bananami.

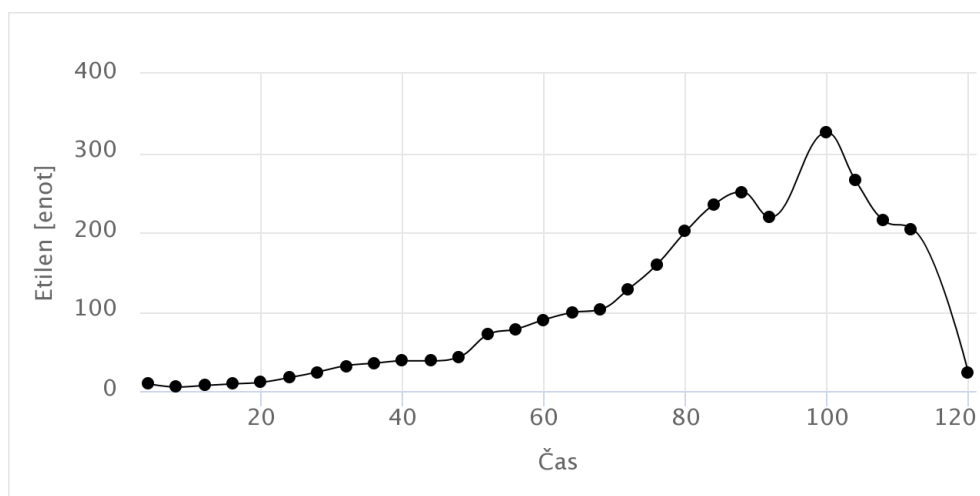
Etilen je v zaprtem sistemu vseskozi naraščal (Slika 5.7), zato nas je zanimala razlika med posameznimi meritvami. Izkazalo se je, da je pri danih pogojih tvorba etilena najbolj vidna na 4-urnem intervalu z vrhom po 100 urah izvajanja eksperimenta. Tvorbo etilena v kozarcu prikazuje Slika 5.8.

Čas [h]	Etilen [enot]	Kromatograf [ppm]
0	5	0
3	22	1,78
20	36	1,83
27	48	1,88
44	81	1,92
51	146	2,12
68	196	3,09
92	478	24,49
102	639	ni meritve
106	676	ni meritve

Tabela 5.6: Meritve etilena s senzorskim sistemom in plinskim kromatografom.



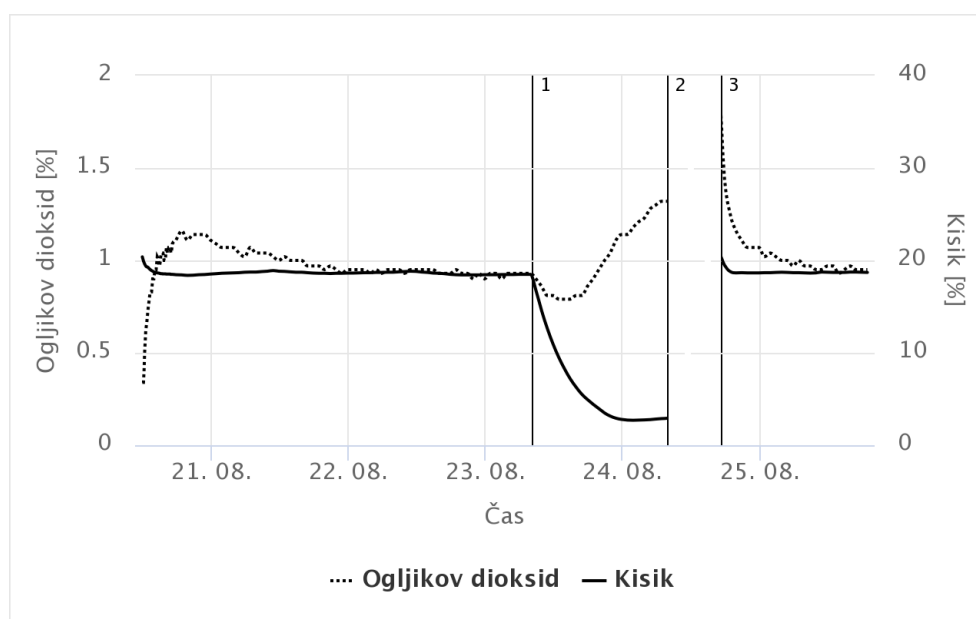
Slika 5.7: Meritve etilena z izračunom v času izvajanja eksperimenta.



Slika 5.8: Tvorba etilena v intervalu 4 ur.

V razgovoru z zaposlenimi na Biotehniški fakulteti smo prišli do zaključka, da banane sproščajo večje količine drugih plinov (arom), ki lahko vzbudijo senzor in vplivajo na izmerjene vrednosti. Te so višje od pričakovanih. Negativen vpliv arom, vode in ogljikovega dioksida omenjajo tudi v članku, kljub temu pa smo dobili pričakovan trend tvorbe etilena [33].

Senzorski sistem je izvajal meritve tudi s preostalimi sensorji. Začetna vrednost koncentracije kisika je bila 20,1 %, ogljikovega dioksida pa 0,1 %. Že nekaj minut po začetku eksperimenta zabeležimo padec koncentracije kisika in povečanje koncentracije ogljikovega dioksida, vrednosti pa se ustalijo po 6. urah. Tedaj je vrednost kisika 18,6 % in ogljikovega dioksida 1,1 % (Slika 5.9). Zmanjšanje koncentracije kisika in povišanje koncentracije ogljikovega dioksida je posledica respiracije oz. dihanja banan, ki je pri višjih temperaturah še posebej izrazito [32]. Banane v procesu zorenja porabljajo kisik, ki proti koncu življenjskega cikla vodi v propadanje sadeža.



Slika 5.9: Koncentracije kisika in ogljikovega dioksida v kozarcu od 20. 8. do 25. 8. 2018.

5.2.2 Jabolka

Jabolka sodijo med manj občutljivo vrsto in jih lahko shranjujemo tudi več mesecev. Pri zorenju sproščajo večje količine etilena kot drugo sadje. Cilj uporabe jabolka v zaprtem kozarcu je bil ugotavljanje koncentracije etilena, kisika in ogljikovega dioksida. Pričakovali smo, da bomo pridobili dejanske meritve etilena, brez oz. z minimalnim vplivom dodatnih arom.

Testiranje je potekalo na sobni temperaturi v laboratoriju na Biotehniški fakulteti. V steklen kozarec prostornine 2500ml smo položili 2 jabolki in ga zaprli s pokrovom z nameščenim senzorskim sistemom (Slika 5.10). Vzporedno smo v drugem kozarcu z jabolki spremljali tvorbo etilena s plinskim kromatografom. Podatke o izvedbi eksperimenta vsebuje Tabela 5.7.

Začetek	3. 9. 2018 ob 9:00
Konec	4. 9. 2018 ob 15:00
Trajanje	1 dan 6 ur
Interval vzorčenja	2 minuti
Način delovanja	Posredovanje meritev na strežnik
Referenčne meritve	1, 3, 5, 23 in 30 ur po začetku

Tabela 5.7: Podatki o eksperimentu.

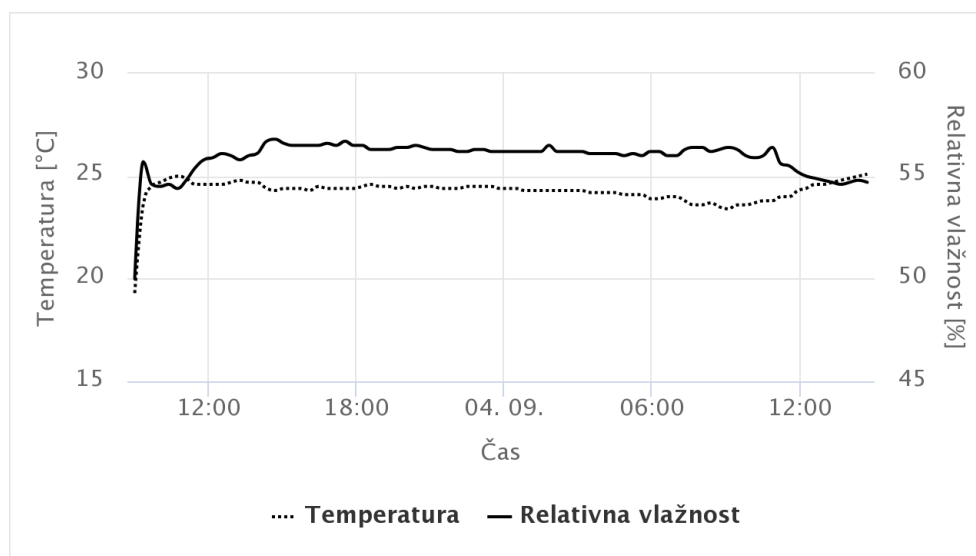


Slika 5.10: Spremljanje zorenja jabolk s senzorskim sistemom.

Tabela 5.8 vsebuje statistične podatke o temperaturi in zračni vlažnosti v kozarcu z jabolki, gibanje pa prikazuje Slika 5.11.

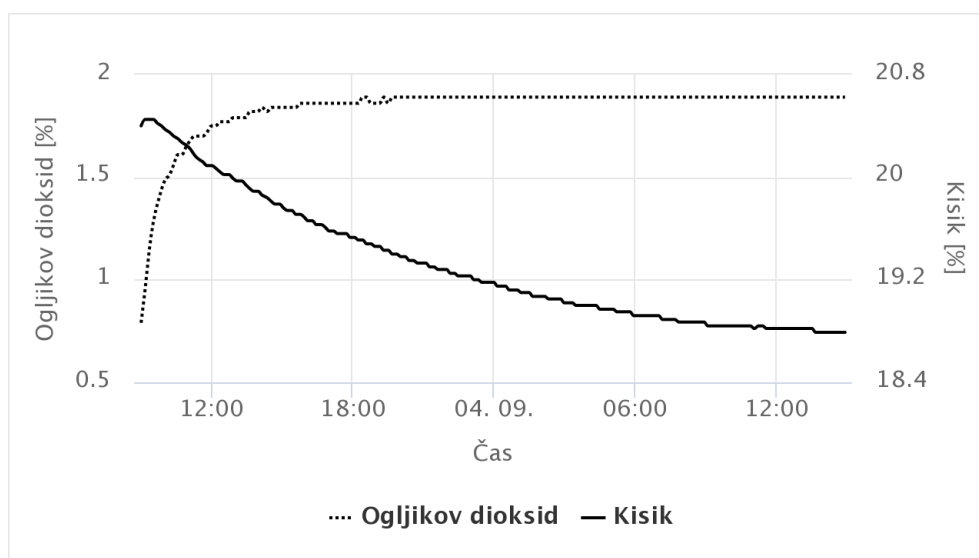
	Temperatura [°C]	Relativna vlažnost [%]
Povprečje	26,9	75,6
Standardni odklon [%]	0,7	5,7
Minimum	23,4	54,6
Maksimum	27,7	82,6

Tabela 5.8: Statistični podatki za temperaturo in relativno vlažnost v kozarcu z jabolki.



Slika 5.11: Gibanje temperature in zračne vlažnosti med opazovanjem zorenja jabolk od 3. 9. do 4. 9. 2018.

Respiracija oz. dihanje je opazno tudi pri zorenju jabolk. Začetna vrednost koncentracije kisika je bila 20,1 %, ogljikovega dioksida pa 0,1 %. Koncentracija kisika tekom eksperimenta ves čas počasi pada in pade do 18,8 %. Koncentracija ogljikovega dioksida v prvih 6. urah naraste in se ustali pri 1,9 % (Slika 5.12).

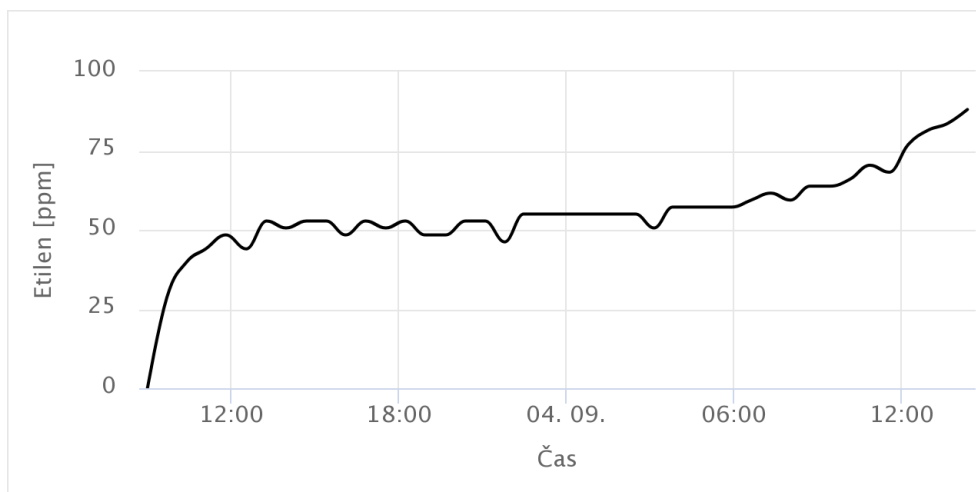


Slika 5.12: Gibanje kisika in ogljikovega dioksida med opazovanjem zorenja jabolk od 3. 9. do 4. 9. 2018.

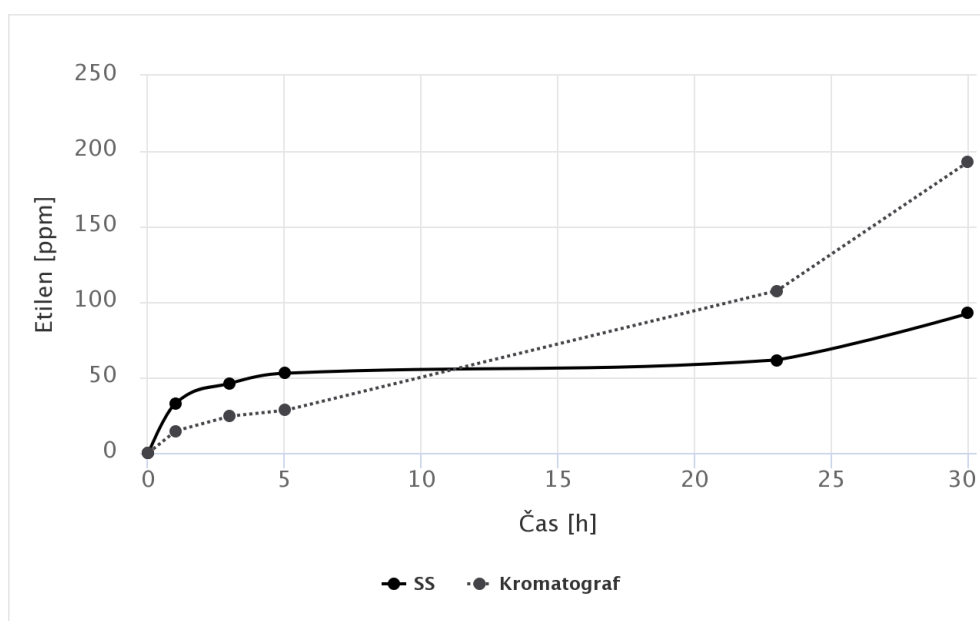
S senzorskim sistemom smo izvajali meritve nastajajočega etilena (Slika 5.13) in jih sproti preverjali s plinskim kromatografom. Senzorske meritve smo s formulo, pridobljeno v postopku kalibracije, preračunali v vrednosti z enotami ppm. Tabela 5.9 prikazuje meritve in izračune koncentracije etilena, Slika 5.14 pa primerjavo med koncentracijo v kozarcu s senzorskim sistemom in referenčnim kozarcem. Rezultati kažejo, da je prvih pet ur s kromatografom izmerjena manjša koncentracija etilena kot pri senzorskem sistemu. V nadaljevanju pa je ravno obratno.

Čas [h]	Senzor [enot]	Izračun [ppm]	Kromatograf [ppm]
0	5	0	0
1	20	33	14,6
3	26	46,2	24,4
5	29	52,8	28,2
23	33	61,6	107,5
30	47	92,4	192,9

Tabela 5.9: Meritve etilena s senzorskim sistemom in plinskim kromatografom.



Slika 5.13: Gibanje koncentracije etilena med opazovanjem zorenja jabolk od 3. 9. do 4. 9. 2018.



Slika 5.14: Primerjava koncentracije etilena v kozarcu s senzorskim sistemom in referenčnim kozarcem.

5.2.3 Jabolka in kumare

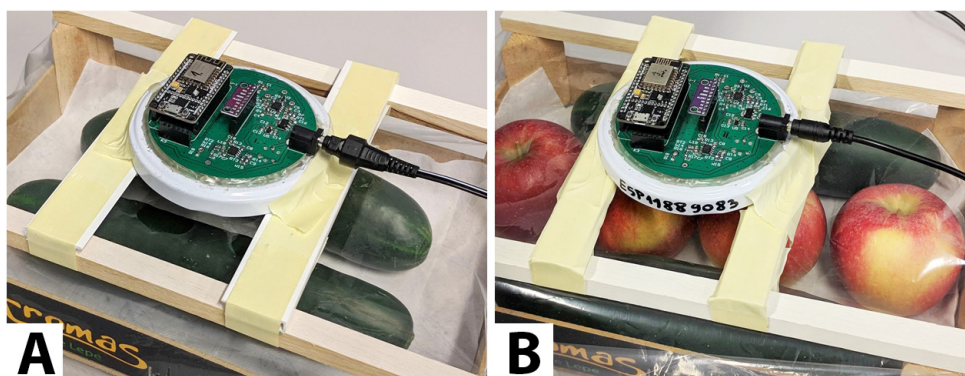
Različnega sadja in zelenjave ni priporočljivo hraniti v istem prostoru, saj določene vrste pospešijo zorenje in nadaljnje propadanje druge. Ugotovili smo, da jabolka sproščajo etilen tako v času zorenja na drevesu kot tudi pri skladiščenju. Nasprotno velja za kumare, ki etilena po obiranju ne sproščajo več, so pa zato nanj močno občutljive.

Etilen, ki ga sproščajo jabolka, pospeši propadanje kumar, kar smo želeli preveriti z naslednjim eksperimentom. Pripravili smo dva zaboja in v vsakega položili po dve kumari (Slika 5.19), v drugega pa dodali še 4 delno zrela jabolka (Tabela 5.10). Vsak zaboj posebej smo pokrili s folijo in namestili senzorska sistema nad odprtine v foliji (Slika 5.15). Na ta način smo ustvarili odprt sistem in dobili meritve ob prehodu zraka z etilenom iz zaboja v prostor. Zaboja smo ločeno drug od drugega shranili v laboratoriju na Fakulteti za računalništvo in informatiko v Ljubljani. Temperatura in zračna vlažnost

v laboratoriju je prikazana v Tabeli 5.11, gibanje pa na Sliki 5.16.

Začetek	5. 9. 2018 ob 16:30
Konec	13. 9. 2018 ob 16:15
Trajanje	8 dni
Interval vzorčenja	5 minut
Način delovanja	Posredovanje meritev na strežnik

Tabela 5.10: Podatki o eksperimentu.

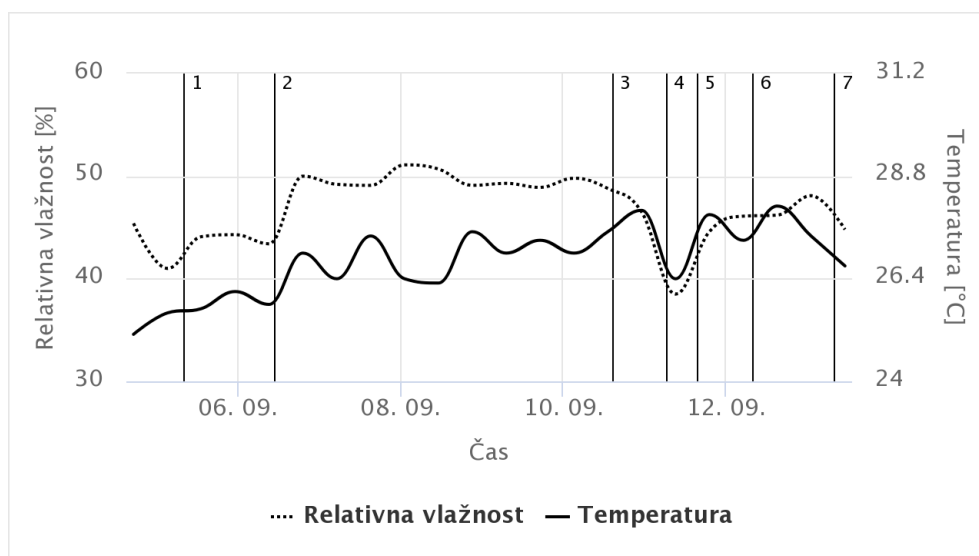


Slika 5.15: Namestitvev senzorskih sistemov: A – Kumare (SS1), B – Jabolka in kumare (SS2).

Meritve v zaboju, kjer so bile samo kumare (SS1) so enake nevtralnim pogojem v laboratoriju. V nadaljevanju predstavljamo samo meritve v zaboju z jabolki in kumarami (SS2).

	Temperatura [°C]	Relativna vlažnost [%]
Povprečje	26,9	46,8
Standardni odklon [%]	0,8	3,3
Minimum	23,4	29,9
Maksimum	28,9	51,9

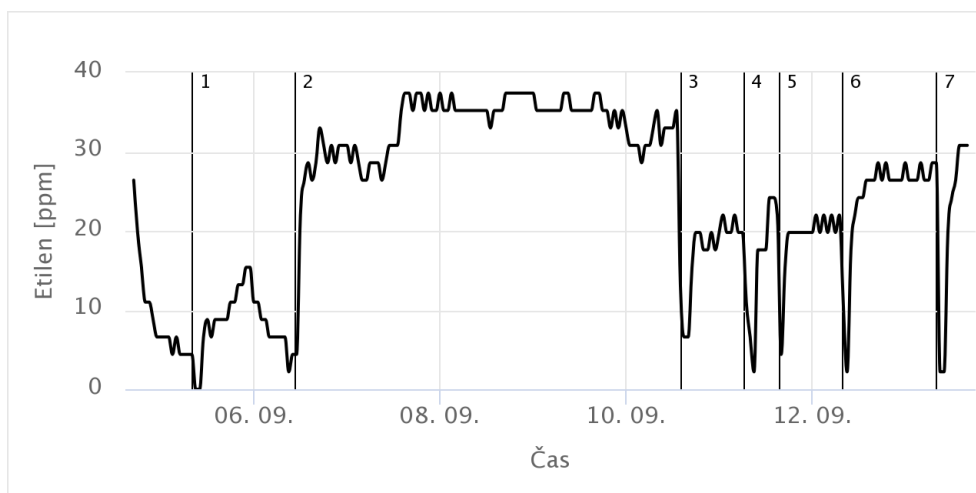
Tabela 5.11: Statistični podatki za temperaturo in relativno vlažnost v zabojih z jabolki in kumarami (SS2).



Slika 5.16: Temperatura in relativna vlažnost v zabojih z jabolki in kumarami (SS2).

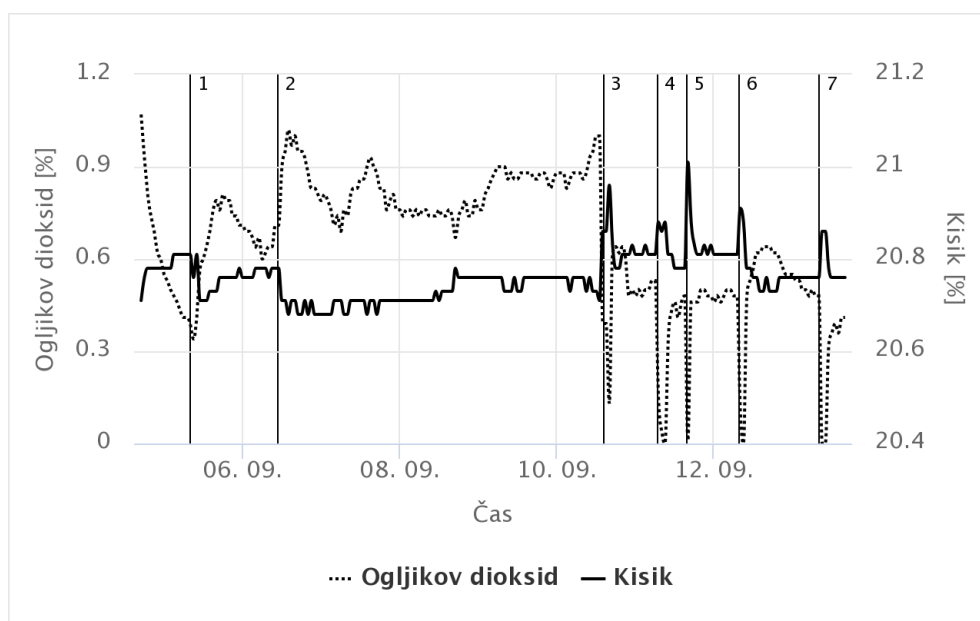
Senzorska sistema smo med izvajanjem poskusa, od 10. 9. dalje, večkrat odstranili in počakali, da so se vrednosti vrnile na nevtralne. S tem smo preverili odzivnost sistema in ponovljivost eksperimenta. Odstranjevanje senzorjev označujejo vertikalne črte na grafih:

1. Povečamo pretok zraka okoli senzorjev.
2. Zmanjšamo pretok zraka.
3. Odpremo za 2 uri.
4. Odpremo za 1 uro.
5. Odpremo za 1 uro.
6. Odpremo za 1 uro.
7. Odpremo za 1 uro.



Slika 5.17: Etilen v zaboju z jabolki in kumarami (SS2). Navpične črte označujejo čas, ko smo spreminjali pogoje za zajem meritev oz. smo senzorski sistem odstranili.

Senzorska sistema sta merila tudi kisik in ogljikov dioksid (Slika 5.18). Vrednosti kisika so se ob zračenju povišale, vrednosti ogljikovega dioksida pa padle, saj se je takrat izboljšala kakovost zraka v laboratoriju. Med oznakama 2 in 3 (Slika 5.17 in 5.18) opazimo daljše obdobje, ko so bili pogoji v zabojih za zajem meritev zaradi vikenda konstantni.



Slika 5.18: Koncentracije kisika in ogljikovega dioksida v zaboju z jabolki in kumarami.

Eksperiment smo uspešno zaključili po osmih dneh. Potrdili smo občutljivost kumar na etilen, ki ga proizvajajo jabolka, saj so kumare močno porumenele in postale neuporabne (Slika 5.20). S senzorskim sistemom smo v zaboju z jabolki zaznali skoraj 40 ppm etilena, medtem ko ga v zaboju brez jabolk ni bilo. Vrednosti kisika in ogljikovega dioksida so bile v obeh primerih enake, prav tako tudi temperatura in relativna vlažnosti. Pri shranjevanju različnih vrst sadja in zelenjave je torej pomembno, katere lahko shranjujemo v istem prostoru in katere ne.



Slika 5.19: Začetek testiranja (5. 9. 2018), ko so vse kumare zelene. Nad zabojem A je bil nameščen SS1, nad zabojem B pa SS2.



Slika 5.20: Konec testiranja (13. 9. 2018), ko sta kumari v zaboju z jabolki porumeneli in postali pikasti (SS2). Nad zabojem A je bil nameščen SS1, nad zabojem B pa SS2.

Poglavje 6

Sklepne ugotovitve

V magistrskem delu smo razvili dva senzorska sistema in spletno aplikacijo za konfiguracijo in analizo podatkov v realnem času. Osnovni senzorski sistem je namenjen merjenju temperature in vlage. Meritve pošilja preko Wi-Fi povezave direktno na strežnik, kjer jih spletna aplikacija obdeluje in napoveduje preostalo dobo uporabnosti. V nadaljevanju smo osnovni senzorski sistem nadgradili s senzorji za kisik, ogljikov dioksid, etilen in svetlobo ter mu dodali možnost shranjevanja podatkov na spominsko kartico. Razširili smo načine delovanja in omogočili uporabniško konfiguracijo preko spletne aplikacije. Ta sprejema senzorske meritve in jih grafično ter tabelarično vizualizira. Ima implementiran algoritem CSIRO, s katerim, na podlagi meritev temperature, sproti napoveduje dobo uporabnosti. V spletni aplikaciji lahko določimo tudi pošiljanje obvestil ob odstopajočih meritvah ali iztekajoči se dobi uporabnosti.

Razvoj pametnega senzorskega sistema predstavlja tri pomembne prispevke na področju hladne verige. Prvi prispevek je izdelava “pametnega” senzorskega sistema, ki podatke pošilja na strežnik v dveh oblikah. Pri prvi pošilja zaporedje vseh senzorskih meritev, pri drugi pa podatke analizira že na napravi in v aplikacijo pošilja le obvestila, ki predstavljajo odstopanja od predvidenih meritev senzorjev. Drugi prispevek je filtriranje in analiza meritev v spletni aplikaciji. Ta omogoča ugotavljanje nepričakovanih sprememb v

okolju in kreiranju obvestil, ki zahtevajo takojšnje ukrepanje v hladni verigi. Tretji prispevek magistrske naloge pa je optimizacija obstoječega algoritma za napovedovanje dobe uporabnosti, ki na osnovi sprotnega zajema meritev dinamično izračunava preostalo dobo uporabnosti in zagotavlja pridobivanje informacij o neustreznih pogojih pri ravnanju z živili. To lahko vodi v zmanjševanje količin zavržene hrane.

V magistrskem delu smo izvedli tudi kalibracijo senzorjev. Izpostavili smo jih različnim plinskim mešanicom etilena, kisika in ogljikovega dioksida, meritve pa preverjali s plinskim kromatografom pri koncentraciji etilena ter plinskim analizatorjem za kisik in ogljikov dioksid. Ugotovili smo, da je postopek kalibracije povezan z ustrezno opremo, ki zagotavlja natančne rezultate. Zaradi omejenih možnosti smo skupaj s sodelavci na Biotehniški fakulteti z določenimi prilagoditvami izvedli umerjanje tako, da smo lahko uspešno preverili delovanje prototipne izvedbe sistema s plinskimi senzorji. Ugotovili smo, da metoda z občasnim zajemom in analizo zraka iz posode pri plinskem kromatografu ni direktno primerljiva z našim senzorskim sistemom. Za praktično uporabo bi bilo senzorje potrebno umeriti pri ustrezni organizaciji, ki pa prinese dodatne stroške.

V eksperimentalnem delu smo testirali izboljšave algoritma za napovedovanje dobe uporabnosti sveže pakiranega brancina, rezultati pa so bili primerljivi z objavljenimi v referenčnem delu [37]. V nadaljevanju smo testirali sproščanje plinov pri zorenju banan, jabolk in kumar. Ugotovili smo, da banane niso najbolj primerne za spremljanje tvorbe etilena v zaprtem prostoru, saj senzor zaznava tudi njihove arome. Boljše rezultate dobimo pri spremljanju zorenja jabolk. Tu arome ne vplivajo na senzorje, tvorba etilena pa je mnogo bolj opazna. V zadnjem eksperimentu smo simulirali shranjevanje jabolk in kumar v istem skladišču. V zaboju, kjer so bila jabolka in kumare, smo zaznavali višje koncentracije etilena, ki ga sproščajo jabolka. Njegov vpliv pa se je odražal na barvi kumar, saj so porumenele in postale neuporabne.

Prototip senzorskega sistema in spletna aplikacija predstavljata zaključeno

celoto, še vedno pa je veliko prostora za izboljšave in nadaljnji razvoj. Predlagana implementacija nakazuje potencialne možnosti za praktično uporabo pri analizah hladne verige ter skladiščenja sadja in zelenjave. Senzorski sistem bi lahko nadgradili s tipkami za upravljanje ter svetlobnimi in zvočni signali za alarmiranje. Tako bi lahko sistem v določenih primerih uporabljali tudi brez spletne aplikacije. Omogočili bi lahko tudi izklapljanje posameznega senzorja in sistem nadgradili za samostojno uporabo z internim virom napajanja. Vse funkcionalnosti sistema delujejo le takrat, ko je na voljo Wi-Fi povezava. Smiselno bi bilo razmisliti tudi o povezavi v katero koli alternativno omrežje. Programski del bi lahko razširili z dodatnimi načini delovanja. Dobo uporabnosti smo napovedovali samo na podlagi temperature, zato bi bilo smiselno preučiti tudi vpliv vlage in plinov.

Literatura

- [1] Internet of Things (IoT). Dostopno na: <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/Internet-of-Things-IoT>. (2018, pridobljeno 01. 07. 2018).
- [2] ADS101x Ultra-Small, Low-Power, I2C-Compatible, 3.3-kSPS, 12-Bit ADCs. Dostopno na: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1015.pdf>. (2009, pridobljeno 25. 6. 2018).
- [3] Agilent 6890N Network Gas Chromatograph. Dostopno na: <https://www.agilent.com/cs/library/specifications/Public/5989-3290EN.pdf>. (2007, pridobljeno 01. 07. 2018).
- [4] Altium Designer Software. Dostopno na: <https://www.altium.com/>. (2018, pridobljeno 01. 07. 2018).
- [5] Arduino IDE. Dostopno na: <https://www.arduino.cc>. (2018, pridobljeno 25. 6. 2018).
- [6] The most commonly used methods for determining the shelf life of food. Dostopno na: <https://natural.btsa-es.com/blog/en/most-commonly-used-methods-determining-shelf-life-food>. (2017, pridobljeno 01. 09. 2018).
- [7] DHT sensors. Dostopno na: <https://learn.adafruit.com/dht/overview>. (2012, pridobljeno 25. 6. 2018).

- [8] Gas Analyzer. Dostopno na: <http://www.echoinstruments.eu/gas-analyzers/gas-analyser/>. (2016, pridobljeno 01. 07. 2018).
- [9] ESP-01. Dostopno na: <https://www.allaboutcircuits.com/projects/breadboard-and-program-an-esp-01-circuit-with-the-arduino-ide/>. (2015, pridobljeno 20. 9. 2018).
- [10] Etilen - signal zrelosti sadja. Dostopno na: http://wiki.fkkt.uni-lj.si/index.php/Biosenzor_etilena. (2016, pridobljeno 01. 09. 2018).
- [11] GL55 Series Photoresistor. Dostopno na: <https://www.kth.se/social/files/54ef17dbf27654753f437c56/GL5537.pdf>. (pridobljeno 25. 6. 2018).
- [12] Winsen sensor - ME3-C2H4. Dostopno na: <https://www.winsen-sensor.com/products/4-series-electrochemical-toxic-gas-sensor/me3-c2h4.html>. (2014, pridobljeno 25. 6. 2018).
- [13] Winsen sensor - ME3-O2. Dostopno na: <https://www.winsen-sensor.com/products/4-series-electrochemical-toxic-gas-sensor/me3-o3.html>. (2014, pridobljeno 25. 6. 2018).
- [14] Winsen sensor - MG811. Dostopno na: <https://www.winsen-sensor.com/products/solid-electrolyte-co2-sensor/mg811.html>. (2014, pridobljeno 25. 6. 2018).
- [15] MicroSD card module for Arduino. Dostopno na: [https://www.dfrobot.com/wiki/index.php/MicroSD_card_module_for_Arduino_\(SKU:DFR0229\)](https://www.dfrobot.com/wiki/index.php/MicroSD_card_module_for_Arduino_(SKU:DFR0229)). (2017, pridobljeno 24. 09. 2018).
- [16] Hladna veriga. Dostopno na: <http://www.nijz.si/sl/oznake/hladna-veriga>. (2015, pridobljeno 25. 11. 2017).
- [17] Rok uporabnosti in varnost živil. Dostopno na: <http://www.nijz.si/sl/rok-uporabnosti-in-varnost-zivil>. (2013, pridobljeno 25. 11. 2017).

-
- [18] NodeMcu Connect Things EASY. Dostopno na: http://nodemcu.com/index_en.html. (2014, pridobljeno 25. 6. 2018).
- [19] PCBWay - PCB prototype service. Dostopno na: <https://www.pcbway.com/>. (2018, pridobljeno 01. 07. 2018).
- [20] Gas Sensor Calibration. Dostopno na: <http://www.permapure.com>. (2018, pridobljeno 01. 07. 2018).
- [21] Respiration of fruits and vegetables. Dostopno na: <https://foodcrumbles.com/respiration-fruits-vegetables/>. (2017, pridobljeno 24. 09. 2018).
- [22] Extech RHT10: Humidity and Temperature USB Datalogger. Dostopno na: <http://www.extech.com/display/?id=14707>. (2015, pridobljeno 01. 07. 2018).
- [23] Ripening 101: Climacteric vs. Non-Climacteric Fruits. Dostopno na: <https://foodandnutrition.org/blogs/student-scoop/ripening-101-climacteric-vs-non-climacteric-fruits/>. (2017, pridobljeno 24. 09. 2018).
- [24] Real time cold chain information system. Dostopno na: <http://www.bt9-tech.com/>. (2015, pridobljeno 25. 11. 2017).
- [25] S. Aceski. Analiza standardov in protokolov interneta stvari. Magistrsko delo, 2016. Dostopno na: <https://repositorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?lang=slv&id=85678>.
- [26] G. Alfian, M. Syafrudin in J. Rhee. Real-Time Monitoring System Using Smartphone-Based Sensors and NoSQL Database for Perishable Supply Chain. *Sustainability*, 9(11):2073, 2017.
- [27] R. Badia-Melis, U. Mc Carthy, L. Ruiz-Garcia, J. Garcia-Hierro in J. R. Villalba. New trends in cold chain monitoring applications-A review. *Food Control*, 86:170–182, 2018.

- [28] S. Bonino. Carbon Dioxide Detection and Indoor Air Quality Control. *Occupational health & safety (Waco, Tex.)*, 85(4):46–48, 2016.
- [29] R. Chaudhri, G. Borriello in R. Anderson. Pervasive computing technologies to monitor vaccine cold chains in developing countries. *IEEE Pervasive Computing. Special issue on Information and Communication Technologies for Development*, 2012.
- [30] J. P. Doyle. *Seafood shelf life as a function of temperature*. Alaska Sea Grant College Program, University of Alaska, 1989.
- [31] Å. Jevinger, M. Göransson in K. Båth. A field test study on a dynamic shelf life service for perishables. *26th Conference of the Nordic Logistics Research Network: NOFOMA 2014, Proceedings*, str. 78–92, 2014. Dostopno na: <http://muep.mau.se/handle/2043/18320>.
- [32] J. Jobling. Correct cool chain management is essential for all fruit and vegetables. *Peach*, 250:300, 2002.
- [33] J. Kathirvelan in R. Vijayaraghavan. An infrared based sensor system for the detection of ethylene for the discrimination of fruit ripening. *Infrared Physics & Technology*, 85:403–409, 2017.
- [34] R. K. Kodali in S. Mandal. IoT based weather station. V *2016 International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT)*, str. 680–683, Dec 2016. doi: 10.1109/ICCICCT.2016.7988038.
- [35] H. Kopetz. Internet of things. V *Real-time systems*, str. 307–323. Springer, 2011.
- [36] L. Ma, L. Wang, R. Chen, K. Chang, S. Wang, X. Hu, X. Sun, Z. Lu, H. Sun, Q. Guo et al. A low cost compact measurement system constructed using a smart electrochemical sensor for the real-time discrimination of fruit ripening. *Sensors*, 16(4):501, 2016.

- [37] K. Marolt. Napovedovanje dobe uporabnosti na podlagi senzorskih podatkov v hladni verigi. Magistrsko delo, 2016. Dostopno na: <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?lang=slv&id=85082>.
- [38] N. Ndraha, H.-I. Hsiao, J. Vlajic, M.-F. Yang in H.-T. V. Lin. Time-temperature abuse in the food cold chain: Review of issues, challenges, and recommendations. *Food Control*, 89:12–21, 2018.
- [39] C. Pan, S. Yu in S. Li. Research on the development mode and evaluation system of green cold chain logistics in China. V *Control Conference (CCC), 2017 36th Chinese*, str. 7541–7546. IEEE, 2017.
- [40] J. Posio, K. Leiviskä, J. Ruuska in P. Ruha. Outlier detection for 2d temperature data. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2):1958–1963, 2008.
- [41] P. G. Salunkhe in R. Nerkar. IoT driven smart system for best cold chain application. V *2016 International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication (ICGT-SPICC)*, str. 64–67, Dec 2016. doi: 10.1109/ICGTSPICC.2016.7955270.
- [42] A. Schön, L. Streit-Juotsa in D. Schumann-Bölsche. Raspberry Pi and Sensor Networking for African Health Supply Chains. V *6th International Conference on Operations and Supply Chain Management, Bali*, 2014.
- [43] L. Shkurti, X. Bajrami, E. Canhasi, B. Limani, S. Krrabaj in A. Hulaaj. Development of ambient environmental monitoring system through wireless sensor network (WSN) using NodeMCU and WSN monitoring. V *2017 6th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*, str. 1–5, June 2017. doi: 10.1109/MECO.2017.7977235.
- [44] K. Sima, T. Syrový, S. Pretl, J. Freisleben, D. Cesek in A. Hamacek. Flexible smart tag for cold chain temperature monitoring. V *Electronics Technology (ISSE), 2017 40th International Spring Seminar on*, str. 1–5. IEEE, 2017.

- [45] M. Szymczak. Using smartphones in supply chains. *Management*, 17 (2):218–231, 2013.
- [46] Z. Zhang, Q. Chen, T. Bergarp, P. Norman, M. Wikström, X. Yan in L. R. Zheng. Wireless sensor networks for logistics and retail. V *2009 Sixth International Conference on Networked Sensing Systems (INSS)*, str. 1–4, June 2009. doi: 10.1109/INSS.2009.5409943.
- [47] L. Zhou in S. Chakrabartty. Self-powered continuous time-temperature monitoring for cold-chain management. V *2017 IEEE 60th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, str. 879–882, Aug 2017. doi: 10.1109/MWSCAS.2017.8053064.