



UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Marijana Maksimović

IOT SISTEM ZA KONTROLU TEMPERATURE ALKOHOLNE
FERMENTACIJE U TRADICIONALNOM PROCESU PROIZVODNJE VINA

MASTER RAD

Podgorica, 2024



UCG

Univerzitet Crne Gore

UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Marijana Maksimović

IOT SISTEM ZA KONTROLU TEMPERATURE ALKOHOLNE
FERMENTACIJE U TRADICIONALNOM PROCESU PROIZVODNJE VINA

MASTER RAD

Podgorica, 2024

PODACI I INFORMACIJE O STUDENTU

Ime i prezime: Marijana Maksimović

Datum i mjesto rođenja: 12.06.1971. godine, Tuzla, BiH

Institucija: Univerzitet Crne Gore – Podgorica

Osnovne studije: Elektrotehnički fakultet, Studije primijenjenog računarstva, 2009

Specijalističke studije: Elektrotehnički fakultet, Studije primijenjenog računarstva 2010

INFORMACIJE O MASTER RADU

Naziv studija: Primijenjeno računarstvo

Naslov rada: IoT sistem za kontrolu temperature alkoholne fermentacije u tradicionalnom procesu proizvodnje vina

Fakultet: Elektrotehnički fakultet

UDK, OCJENA I ODBRANA MASTER RADA

UDK:

Datum prijave rada: 13.06.2024. godine

Datum prihvatanja teme: 16.09.2024. godine

Mentor: Prof. dr Božo Krstajić

Komisija za odbranu radu:

Prof. dr Božo Krstajić, redovni profesor, Elektrotehnički fakultet – UCG, mentor

Prof. dr Milutin Radonjić, redovni profesor, Elektrotehnički fakultet – UCG

Doc. dr Danijela Raičević, Biotehnički fakultet – UCG

Lektor: Autolektura

Datum odbrane: 25.12.2024. godine

IZJAVA O AUTORSTVU

Kandidat: Marijana Maksimović

Na osnovu člana 22 Zakona o akademskom integritetu, ja, dolje potpisana

IZJAVLJUJEM

pod punom krivičnom i materijalnom odgovornošću da je master rad pod nazivom “**IoT sistem za kontrolu temperature alkoholne fermentacije u tradicionalnom procesu proizvodnje vina**” rezultat sopstvenog istraživačkog rada, da nisam kršila autorska prava i koristila intelektualnu svojinu drugih lica i da je navedeni rad moje originalno djelo.

Podgorica, 2024. godine

Potpis studenta



Sažetak

U ovom radu prezentovana je primjena tehnologije Internet stvari (IoT – *Internet of things*) u tradicionalnoj proizvodnji vina, sa fokusom na kontrolu temperature tokom alkoholne fermentacije. Crna Gora ima dugu tradiciju bavljenja vinogradarstvom i proizvodnjom vina, a Ogledno imanje “Lješkopolje” Biotehničkog fakulteta je posebno prepoznato po visokokvalitetnim vinima. Međutim, tradicionalni procesi proizvodnje vina koji se tamo jednim dijelom primjenjuju mogu biti neefikasni i podložni greškama.

Predmet istraživanja ovog rada je analiza tradicionalnog procesa alkoholne fermentacije i dizajniranje IoT sistema za djelimičnu automatizaciju ovog procesa sa ciljem kontrole temperature groždanog kljuka u proizvodnji vina i time poboljšanje efikasnosti i produktivnosti proizvodnje i kvaliteta vina.

U radu je dat predlog za realizaciju niskobudžetnog sistema za monitoring i moguću kontrolu temperature alkoholne fermentacije kod tradicionalne proizvodnje vina.

Metodologija se zasniva na implementaciji temperaturnih senzora unutar fermentacionih posuda, koji su povezani sa centralizovanim sistemom putem API-ja (API – *Application Programming Interface*), a podaci se čuvaju i analiziraju na Cloud platformi (npr. *ThingSpeak*). Na ovaj način proizvođači vina imaju daljinski pristup vrijednostima temperature u realnom vremenu, što omogućava monitoring nad procesom fermentacije bez potrebe za fizičkim prisustvom. Ovaj pristup ima za cilj poboljšanje efikasnosti, produktivnosti i kvaliteta tradicionalno proizvednih vina, kombinujući tradiciju sa modernom IoT tehnologijom i omogućavajući konkurentnost na tržištu.

Istraživanje u ovom radu tretira temperaturu kao jedan od najvažnijih parametara za aktivnost kvasca, koja direktno utiče na ukus i aromu vina. Primjena IoT sistema za kontrolu temperature pokazuje značajno poboljšanje u postizanju konzistentnosti proizvodnje i smanjenje rizika od grešaka. Istraživanje ukazuje na prednosti implementacije IoT tehnologija u unapređivanju tradicionalne proizvodnje vina, što može pomoći proizvođačima da očuvaju vinsku tradiciju Crne Gore dok odgovaraju na zahtjeve modernog tržišta.

Ključne riječi: Internet of things (IoT), alkoholna fermentacija, tradicionalna proizvodnja vina, kvasac, ThingSpeak, mikrokontrolerski sistemi

Abstract

This paper presents the application of Internet of Things (IoT) technology in traditional wine production, with a focus on temperature control during alcoholic fermentation. Montenegro has a long tradition of viticulture and wine production, and the “Lješkopolje” experimental field of the Faculty of Biotechnology is especially recognized for its high-quality wines. However, the traditional wine production processes that are partly applied there can be inefficient and prone to errors.

The subject of this research is the analysis of the traditional process of alcoholic fermentation and the design of an IoT system for the partial automation of this process with the aim of controlling the temperature of grape skins in wine production and thereby improving the efficiency and productivity of wine production and quality.

The paper presents a proposal for the implementation of a low-budget system for monitoring and possible temperature control of alcoholic fermentation in traditional wine production.

The methodology is based on the implementation of temperature sensors inside fermentation vessels, which are connected to a centralized system via an API (API – *Application Programming Interface*), and the data is stored and analyzed on a Cloud platform (eg *ThingSpeak*). With this, wine producers have remote access to temperature values in real time, which enables monitoring of the fermentation process without the need for physical presence. This approach aims to improve the efficiency, productivity and quality of traditionally produced wines, combining tradition with modern IoT technology and enabling competitiveness in the market.

The research in this paper treats temperature as one of the most important parameters for yeast activity, which directly affects the taste and aroma of wine. The application of IoT systems for temperature control shows a significant improvement in achieving production consistency and reducing the risk of errors. The research points to the advantages of implementing IoT technologies in the improvement of traditional wine production, which can help producers to preserve the wine tradition of Montenegro while responding to the demands of the modern market.

Keywords: Internet of Things (IoT), alcoholic fermentation, traditional winemaking, yeast, ThingSpeak, microcontroller systems

Posveta

S posebnom zahvalnošću želim da istaknem svoju porodicu, prijatelje i kolege, čija su neizmjerena podrška, strpljenje i ohrabrenje bili nepresušan izvor snage i motivacije tokom izrade ovog rada. Njihova vjera u mene, čak i u trenucima kada sam sumnjala u vlastite mogućnosti, pomogli su mi u ostvarenju ovog cilja.

Duboku zahvalnost dugujem rukovodstvu Biotehničkog fakulteta, kao i zaposlenima na Oglednom imanju "Lješkopolje", koji su svojom stručnom podrškom, praktičnim savjetima i bogatim iskustvom omogućili uspješnu realizaciju ovog istraživanja. Njihova spremnost da podijele svoje znanje bila je neprocjenjiva.

Posebno se zahvaljujem članovima komisije, prof. dr Milutinu Radonjiću i doc. dr Danijeli Raičević, na njihovom trudu, profesionalizmu i konstruktivnim sugestijama koje su u velikoj mjeri obogatile ovaj rad.

Na kraju, najdublju zahvalnost upućujem svom mentoru, prof. dr Božu Krstajiću. Njegova posvećenost, vizija i nesebična podrška obilježili su ne samo izradu ovog rada, već i čitav moj akademski i profesionalni razvoj. Njegova kreativnost i mudrost usmjerili su me ka postizanju ciljeva koje sam nekada smatrala nedostižnima, a njegova vjera u moj potencijal inspirisala me da istrajem čak i u najtežim trenucima.

Ovaj rad posvećujem svom sinu Filipu, uz poruku: "Uvijek se čini nemogućim dok se ne uradi". Njegov osmijeh i prisustvo podstakli su me da ne odustanem i da vjerujem da su snovi dostižni uz trud, vjeru i istrajnost.

Marijana Maksimović

Sadržaj

1. Uvod	2
2. Internet stvari (IoT).....	4
2.1. Osnovni koncept IoT-a.....	4
2.2 IoT arhitektura i tehnologije.....	5
2.3 Osnovne komponente IoT-a	11
2.4 Izazovi razvoja IoT-a	14
2.5 Industrijski Internet of Things (IIoT)	16
2.6 Pametna poljoprivreda.....	18
2.6.1. Elementi pametne poljoprivrede	19
2.6.2. Primjena IoT tehnologije u vinogradarstvu	21
2.6.3. Primjene IoT tehnologije u proizvodnji vina	23
3. Tradicionalni proces proizvodnje crvenog vina	26
3.1 Opis procesa proizvodnje vina	26
3.2 Faktori koji utiču na proces fermentacije	31
3.3 Monitoring i kontrola fermentacije	41
4. Arhitektura predloženog sistema	47
4.1 Funkcionalni zahtjevi sistema	48
4.2 Nefunkcionalni zahtjevi	49
4.3 Izbor platforme i okruženja	50
4.4 Realizacija prototipa sistema i implementacija u vinskom podrumu.....	57
5. Rezultati eksperimentalne primjene	64
5.1 Postavka eksperimenta	65
5.2 Rezultati eksperimenta	68
6. Zaključak.....	76
7. Literatura	78
8. Dodatak.....	82

1. Uvod

U eri digitalizacije, počev od svakodnevnih životnih aktivnosti, kao i u sferi obrazovanja, zdravstva, javne uprave, transporta, pametne poljoprivrede primjena IoT tehnologija predstavlja osnov za unapređivanju ovih procesa. Od pametnih kuća, zgrada, vozila do pametnih učionica, pametnih transportnih sistema, pametnih vinograda, digitalna transformacija omogućava optimizaciju, kontrolu i unapređenje efikasnosti u ovim oblastima [1]. U većini razvijenih zemalja implementirane su brojne IoT tehnologije. U Crnoj Gori i dalje postoje sektori u kojima se neki proizvodni procesi obavljaju na tradicionalni način i koji tek treba da iskoriste prednosti IoT tehnologija. Jedan od njih je i proizvodnja vina u porodičnim vinarijama, ali i u vinarijama sa dugogodišnjom proizvodnjom kao što je Ogledno imanje “Lješkopolje” Biotehničkog fakulteta, gdje se vino i dalje proizvodi na tradicionalan način paralelno sa savremenim metodama (u vinifikatorima). Upravo zbog dugogodišnje tradicije i prepoznatljivosti vina sa ovog imanja kod nas i u regionu, kao i opšteg značaja vinarstva za crnogorsku poljoprivredu, osnovni motiv ovog rada je bio da se istraži kako IoT može unaprijediti ovaj proces, s posebnim fokusom na fermentaciju groždanog kljuka, kao osnove u proizvodnji vina.

Crna Gora sa svojim povoljnim geografskim uslovima, ima dugu tradiciju uzgajanja vinove loze i proizvodnje vina [2]. Imanje “Lješkopolje” posebno je značajno zbog visokokvalitetnih sorti grožđa koje se tamo uzgajaju. Međutim, tradicionalne metode proizvodnje vina često uključuju manuelno nadgledanje i kontrolu, što može biti neefikasno i podložno greškama. Predmet istraživanja ovog rada je analiza tradicionalnog procesa alkoholne fermentacije i dizajniranje IoT sistema za djelimičnu automatizaciju procesa sa ciljem kontrole temperature groždanog kljuka u proizvodnji vina i time poboljšanje efikasnosti i produktivnosti proizvodnje, kao i kvaliteta vina. Istraživanje ima multidisciplinarni karakter, te je bilo neophodno uključivanje kompetentnih stručnjaka iz oblasti vinarstva koji će uraditi analizu uzoraka vina koje je proizvedeno tokom ovog istraživanja. Implementacijom IoT sistema za upravljanje temperaturom tokom alkoholne fermentacije u tradicionalnom procesu proizvodnje vina, proizvodni proces može postati efikasniji, ekonomičniji i bolje kontrolisan. To će omogućiti proizvođačima vina u Crnoj Gori da unaprijede kvalitet svojih proizvoda i povećaju konkurentnost na tržištu.

Kontrola temperature tokom alkoholne fermentacije groždanog kljuka je ključna za kvalitet i karakteristike vina, jer direktno utiče na rad kvasaca, kao i na razvoj aroma i ukusa. Cilj je bilo postavljanje senzora unutar fermentacionih posuda kako bi se pratile temperature u realnom vremenu i omogućila precizna kontrola uslova fermentacije. Na ovaj način, proizvođači vina mogu postići konzistentan kvalitet i smanjiti rizik od grešaka koje mogu nastati tokom fermentacije.

Metodologija ovog rada zasniva se na implementaciji temperaturnih senzora za kontinuirano mjerenje temperature tokom fermentacije groždanog kljuka. Senzori se postavljaju unutar fermentacionih sudova i povezuju se sa centralnim Cloud sistemom putem API-ja (*Application Programming Interfaces*). Podaci prikupljeni od senzora šalju se na Cloud platformu koja omogućava skladištenje, analizu i vizualizaciju podataka u realnom vremenu. Korištena je ThingSpeak IoT platforma [3] koja omogućava prikupljanje, pohranu, analizu i vizualizaciju podataka u stvarnom vremenu sa IoT uređaja, senzora i aplikacija. Putem softverske aplikacije, proizvođači mogu primiti definisane alarme i pristupati ovim podacima daljinski, što im omogućava da prate i optimizuju proces fermentacije bez potrebe za fizičkim prisustvom.

Tokom fermentacije temperatura mora biti precizno kontrolisana. Ukoliko temperatura padne ispod optimalne, fermentacija se može usporiti ili zaustaviti, dok previsoka temperatura može uzrokovati prebrzu fermentaciju i proizvodnju neželjenih jedinjenja i negativno uticati na aromatski profil vina. Optimalna temperatura fermentacije iznosi od 22 do 28 °C za crvena vina, koja omogućava adekvatnu ekstrakciju antocijana i tanina, što je u našem istraživanju uzeto kao referentna vrijednost. Implementacijom IoT senzora za mjerenje temperature, proizvođači mogu automatski prilagoditi uslove fermentacije, čime se poboljšava konačni kvalitet vina.

Ovaj rad ima za cilj da pokaže kako primjena IoT tehnologija u tradicionalnoj proizvodnji vina može donijeti značajne prednosti. Kontrola temperature tokom fermentacije je samo jedan od aspekata proizvodnje vina koji može biti unaprijeđen korišćenjem savremenih tehnologija. Na taj način, proizvođači vina u Crnoj Gori mogu kombinovati bogatu tradiciju sa modernom tehnologijom, stvarajući visokokvalitetne proizvode.

2. Internet stvari (IoT)

Internet stvari (IoT) je revolucionaran koncept koji omogućava međusobnu komunikaciju uređaja i aplikacija putem interneta, stvarajući mrežu pametnih uređaja koji međusobno razmjenjuju informacije i sarađuju na potpuno novi način. IoT koncept omogućava fizičkim objektima, poznatim kao “stvari”, da komuniciraju, prikupljaju i dijele podatke koristeći različite tehnologije poput senzora, radiofrekventne identifikacije (RFID) i drugih komunikacionih uređaja [4].

2.1. Osnovni koncept IoT-a

Osnovna ideja IoT-a jeste povezivanje fizičkih uređaja sa internetom, omogućavajući im da prikupljaju podatke iz svog okruženja i komuniciraju sa drugim uređajima i sistemima u realnom vremenu. Ovi uređaji mogu biti svakodnevni predmeti kao što su pametni satovi, termostati, alarmi, kućni uređaji, pa čak i automobili i industrijske mašine. Svi ovi uređaji prikupljaju i prenose podatke koji se koriste za kontrolu, optimizaciju i unapređenje različitih sistema i procesa.

Jedan od ključnih elemenata IoT sistema je upotreba uređaja za identifikaciju, kao što su RFID čipovi, koji omogućavaju prepoznavanje i praćenje fizičkih objekata na daljinu. Svaka “stvar” ili uređaj u IoT ekosistemu može biti označen ovim tehnologijama, što omogućava praćenje njegovog statusa i lokacije, a zatim i kontrolu nad njegovim funkcionisanjem putem udaljenih računarskih sistema povezanih sa internetom. Ova funkcionalnost je posebno korisna u oblastima kao što su logistika, skladištenje i upravljanje imovinom.

IoT ima široku primjenu u svakodnevnom životu. Na primjer, pametni uređaji povezani na Internet mogu se koristiti za praćenje i kontrolu različitih aspekata kućne automatizacije, kao što su osvjjetljenje, klima-uređaji, sigurnosni sistemi i kućni aparati.

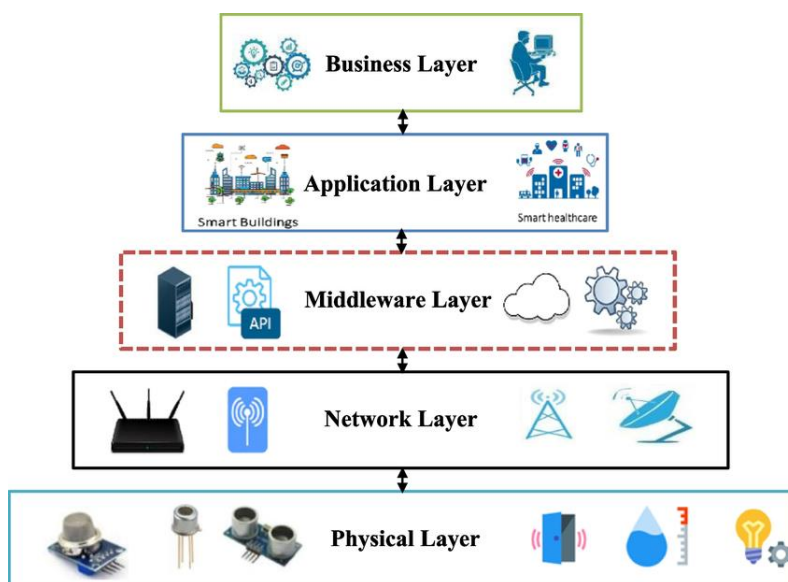
U industrijskom sektoru, IoT je postao ključna tehnologija za transformaciju tradicionalnih procesa u Industriji 4.0. Uređaji unutar industrijskog IoT sistema (IIoT) omogućavaju mašinama da komuniciraju međusobno putem M2M (mašina – mašina) tehnologije, čime se postiže automatsko nadgledanje i optimizacija proizvodnih procesa [5].

IoT je transformisao način na koji svijet funkcioniše, omogućavajući uređajima da postanu “pametni” i da komuniciraju jedni s drugima putem interneta. Bilo da se radi o industrijskim

mašinama, kućnim aparatima ili vozilima, IoT pruža neograničene mogućnosti za unapređenje efikasnosti, bezbjednosti i kvaliteta života. Sa napretkom tehnologije IoT će nastaviti da evoluirati i igrati sve značajniju ulogu u svim aspektima svakodnevnog života, čineći svijet povezanijim i inteligentnijim mjestom.

2.2 IoT arhitektura i tehnologije

IoT arhitektura se sastoji od više slojeva, od kojih svaki ima specifičnu ulogu u funkcionisanju cjelokupnog sistema. Ovi slojevi omogućavaju efikasno prikupljanje, obradu i upotrebu podataka, pružajući pametnu i povezanu infrastrukturu. U nastavku su detaljno opisani ključni slojevi IoT arhitekture (sl. 1).



Slika 1. IoT arhitektura – https://www.researchgate.net/figure/Five-layer-architecture-of-IoT_fig2_364333212

❖ Fizički sloj

Fizički sloj predstavlja osnovu IoT arhitekture i nalazi se na njenom dnu. Ovaj sloj sadrži fizičke uređaje poput senzora, RFID čipova, barkodova (sl. 2) i drugih objekata koji su povezani u IoT mrežu. Ovi uređaji su zaduženi za prikupljanje informacija iz fizičkog svijeta, kao što su

temperatura, vlažnost, svjetlost, pritisak, kretanje, i mnogi drugi parametri. Senzori služe kao “oči i uši” IoT sistema, omogućavajući mu da “osjeti” svoje okruženje. Ovi podaci su ključni za dalju analizu i donošenje odluka, jer pružaju osnovne informacije koje su neophodne za rad viših slojeva. Prikupljene informacije se zatim prenose u sljedeći sloj arhitekture – mrežni sloj.



Slika 2. RFID i barkod

❖ Mrežni sloj

Mrežni sloj igra ključnu ulogu u prenosu informacija iz fizičkog sloja do sistema za obradu podataka. On funkcionira kao medijum koji omogućava komunikaciju između uređaja na terenu i centralizovanih servera ili sistema za analizu. Prenos podataka može biti realizovan preko različitih vrsta mreža, uključujući žične (Ethernet) i bežične medije, kao što su Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, 3G/4G/5G mreže, pa čak i satelitske komunikacije (tabela 1). Ovaj sloj obezbeđuje da podaci prikupljeni u fizičkom sloju stignu na pravo mjesto, u pravo vrijeme, kako bi se dalje obradili i analizirali. Pouzdanost i brzina prenosa podataka su od ključne važnosti za ovaj sloj, posebno u kritičnim IoT aplikacijama, kao što su na primjer zdravstvena njega ili autonomna vozila. Ove tehnologije čine osnovu za povezivanje u IoT sistemima, pri čemu svaka ima specifične prednosti u zavisnosti od primjene, potrebne brzine, dometa i potrošnje energije.

Tabela.1. Pregled najkorišćenijih mrežnih tehnologija

Mrežna tehnologija	Vrsta	Brzina	Pouzdanost	Domet	Primjena
Ethernet	Žičana	10 Mbps – 100 Gbps	Pouzdan za stalnu i brzu vezu	do 100 metara (Ethernet CAT5/6).	Kućne i poslovne mreže, industrijski sistemi
Wi-Fi	Bežična	11 Mbps (Wi-Fi 802.11b) – 9,6 Gbps (Wi-Fi 6)	Srednja, podložna smetnjama	100 metara u zatvorenom prostoru	Kućne i poslovne mreže, IoT uređaji, mobilni telefoni, laptopovi
Bluetooth	Bežična	3 Mbps (Bluetooth 2.0), – 50 Mbps (Bluetooth 5.0)	Srednja, koristi se za kratke udaljenosti	Tipično 10 metara	Povezivanje pametnih uređaja (telefoni, slušalice, pametni satovi)
ZigBee	Bežična	250 kbps	Visoka za niskoenergetske aplikacije	100 metara u zatvorenom prostoru	Pametne kuće, pametna rasveta, IoT uređaji sa niskom potrošnjom energije, industrijski senzori
3G/4G/5G	Mobilna bežična	3G – 42 Mbps 4G – 1 Gbps 5G – 10 Gbps	Visoka, globalna pokrivenost	Širok, pokriva velike geografske oblasti	Mobilna komunikacija, IoT uređaji, autonomna vozila, pametni gradovi
LoRaWAN (Long Range Wide Area Network)	Bežična	0.3 kbps – 50 kbps	Visoka za male pakete podataka, Široka pokrivenost u ruralnim i urbanim zonama	10 – 15 km (ruralno), 2 – 5 km (urbano)	Praćenje resursa, senzori u poljoprivredi, pametno mjerenje potrošnje energije.
Narrowband IoT (NB-IoT)	Bežična	Do 250 kbps	Visoka, – Duboka penetracija	Do 10 – 15 km	Pametni parking, daljinsko očitavanje brojila.
Z-Wave	Bežična	Do 100 kbps	Pouzdana za kućnu automatizaciju Ograničena pokrivenost u malim mrežama	Do 30 – 100 m	Pametna rasvjeta, sistemi sigurnosti, automatizacija doma.
RFID (Radio Frequency Identification)	Bežična	< 1 Mbps (pasivni tagovi)	Visoka, za praćenje objekata na kratkim udaljenostima	Pasivni – nekoliko cm – 1 m, aktivni – do 100 m	Logistika, praćenje robe, sistemi naplate

❖ Međusloj

Međusloj, koji se nalazi iznad mrežnog sloja, ima zadatak da obrađuje informacije koje dolaze iz mrežnog sloja. Ovaj sloj koristi napredne algoritme i računarsku obradu kako bi analizirao i donosio odluke na osnovu primljenih podataka. U međusloju se koristi tehnologija poput “Edge” ili “Fog” computing-a, gdje se podaci mogu obrađivati na ivici mreže, smanjujući kašnjenje i omogućavajući brže donošenje odluka. Ovo je posebno korisno za aplikacije koje zahtijevaju brzu reakciju, kao što su sistemi za automatsku kontrolu u industriji ili autonomna vozila. Međusloj također može filtrirati i optimizirati podatke prije nego što ih proslijedi aplikacionom sloju za dalje upravljanje i analizu.

Edge computing i Fog computing su dvije ključne tehnologije koje omogućavaju obradu podataka bliže izvoru, na ivici mreže, umjesto da se podaci šalju u centralizovane Cloud servere za obradu. Ove tehnologije su razvijene kako bi se smanjila kašnjenja u prenosu podataka i omogućila brža reakcija na osnovu prikupljenih informacija, što je ključno za mnoge IoT aplikacije [6] [7].

Razlike između Edge i Fog computing-a je u lokaciji obrade i njihovoj skalabilnosti. U Edge computing-u, podaci se obrađuju direktno na pametnim telefonima, mikrokontrolerima (Arduino, PLC), mikroracunarima (RPi) ili veoma blizu njih, dok u Fog computing-u, obrada se odvija na mrežnim čvorovima (kao što su ruteri ili lokalni serveri) između uređaja i Cloud-a. Fog computing omogućava veću skalabilnost jer obuhvata više nivoa mreže između uređaja i Cloud-a, dok je Edge computing ograničen samo na lokalnu obradu.

❖ Aplikacioni sloj

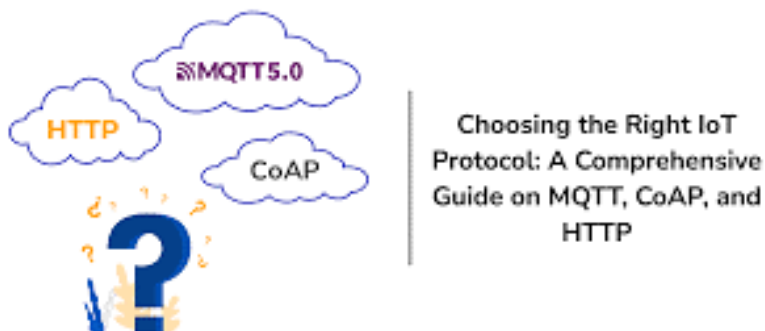
Aplikacioni sloj koristi obrađene informacije iz međusloja kako bi omogućio globalno upravljanje uređajima u IoT sistemu. Ovaj sloj je odgovoran za implementaciju specifičnih aplikacija koje omogućavaju korisnicima da komuniciraju sa uređajima, prate njihove performanse i kontrolišu ih. U praksi, to može značiti upravljanje pametnim kućnim uređajima, industrijskim mašinama ili čak gradskom infrastrukturom. Na primjer, u pametnim gradovima (sl. 3), aplikacioni sloj može upravljati semaforima, pametnim osvjjetljenjem, kao i sistemima za nadzor i kontrolu

saobraćaja. Takođe, u industrijskim postrojenjima, ovaj sloj može kontrolisati rad mašina, prikupljati informacije o njihovom statusu i optimizirati njihove performanse.



Slika 3. Pametni grad – <https://pcpress.rs/pametan-zivot-u-pametnom-gradu/>

Protokoli igraju važnu ulogu u aplikacionom sloju IoT arhitekture, i njihov izbor zavisi od specifičnih zahtjeva aplikacije, kao što su brzina, pouzdanost, potrošnja energije i složenost uređaja. U narednom dijelu su opisani neki od najčešće korištenih aplikacionih protokola (MQTT, CoAP, i HTTP/REST), njihove karakteristike i primjena (sl. 4), pri čemu treba napomenuti još DDS (*Data Distribution Service*), XMPP (*Extensible Messaging and Presence Protocol*) i AMQP (*Advanced Message Queuing Protocol*) protokole.



Slika 4. Aplikacioni protokoli

- MQTT (*Message Queue Telemetry Transport*)

MQTT je protokol dizajniran za uređaje sa ograničenim resursima i mreže sa niskom propusnošću. Koristi publish/subscribe model komunikacije, gdje objavljiivači šalju podatke brokera, a pretplatnici primaju te podatke na osnovu interesnih tema. Nudi tri nivoa kvaliteta usluge (QoS). Pogodan za M2M komunikaciju i aplikacije poput pametnih kuća, zdravstvene njege i nadzora. Zasniva se na TCP protokolu, što može biti manje pogodno za IoT mreže sa visokom stopom gubitka paketa.

- CoAP (*Constrained Application Protocol*)

CoAP je protokol zasnovan na REST (*Representational State Transfer*) principima i koristi sličan model kao HTTP, sa osnovnim CRUD operacijama (Create, Read, Update, Delete), ali je optimiziran za male uređaje i koristi UDP (*User Datagram Protocol*) umjesto TCP-a, čineći ga bržim i efikasnijim u mrežama sa ograničenjem resursa. Pogodan za IoT uređaje sa niskom potrošnjom energije. Efikasan na nepouzdanim mrežama zahvaljujući UDP protokolu. Jednostavan format poruka. Za razliku od HTTP-a, CoAP podržava multicast, što omogućava slanje jedne poruke većem broju uređaja u mreži odjednom. Ne pruža istu pouzdanost kao TCP-based protokoli [8].

- HTTP/REST (*Representational State Transfer*)

REST koristi standardne HTTP metode (GET, POST, PUT, DELETE) za komunikaciju između klijenata i servera. REST je zasnovan na *stateless* arhitekturi, što znači da serveri ne čuvaju informacije o stanju između zahtjeva. Jednostavan je za implementaciju, široko prihvaćen i koristi se u mnogim aplikacijama (web, mobilne aplikacije). Zasniva se na TCP-u za pouzdanu komunikaciju. Koristi standardni format podataka (JSON, XML). Za IoT aplikacije može biti neefikasan zbog visoke potrošnje energije i složenosti komunikacije.

Ako bi se poredili ovi protokoli, njihove namjene bi bile sljedeće:

MQTT je idealan za M2M komunikaciju i IoT aplikacije sa ograničenim resursima i mrežama sa niskom i visokom pouzdanošću.

CoAP je dizajniran za slične svrhe kao MQTT, ali je prilagođen za nepouz dane mreže sa nižim nivoima potrošnje energije, jer koristi UDP.

HTTP/REST je najčešće korišćen protokol za aplikacije, ali je manje efikasan za IoT aplikacije koje zahtjevaju nisku potrošnju energije i efikasnu komunikaciju.

❖ Poslovni sloj

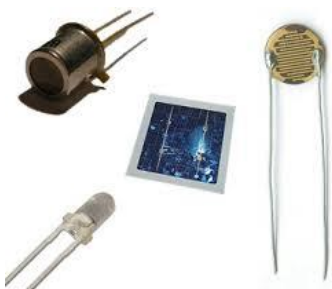
Na vrhu IoT arhitekture nalazi se poslovni sloj, koji ima ključnu ulogu u upravljanju cjelokupnim IoT sistemom. Ovaj sloj je zadužen za koordinaciju svih aplikacija i usluga koje čine IoT sistem funkcionalnim. Poslovni sloj prikuplja informacije i statistiku koji dolaze iz aplikacionog sloja, analizirajući ih kako bi se donijeli strateški zaključci i planovi za budućnost. Na osnovu ovih podataka, poslovni sloj može vizualizovati trendove, identifikovati potencijalne probleme i osmisliti strategije za optimizaciju rada sistema [9].

IoT arhitektura je fleksibilna i može se prilagoditi specifičnim potrebama i aplikacijama u zavisnosti od domena primjene. Pored standardne slojevite strukture, IoT sistemi mogu biti prošireni dodatnim funkcionalnostima, kao što su mehanizmi za detekciju, autentifikaciju, identifikaciju, kontrolu i upravljanje. Takođe, skalabilnost, interoperabilnost i modularnost su ključni aspekti IoT sistema, koji omogućavaju da se arhitektura razvija i prilagođava novim tehnologijama i zahtjevima.

2.3 Osnovne komponente IoT-a

❖ Senzori

Povezani uređaji koriste senzore (sl. 5) za prikupljanje podataka (temperatura, vlažnost, osvjetljenje, itd.) u realnom vremenu, i transformišu ih u digitalne podatke, čime postaju “inteligentni” objekti sposobni za automatsku interakciju [10].



Slika 5. Senzori

❖ Aktuatori

Aktuatori u Internetu stvari (IoT) su uređaji koji izvršavaju fizičke akcije na osnovu odluka koje donose IoT sistemi, obično nakon obrade podataka prikupljenih od senzora. Dok senzori služe za prikupljanje informacija iz okoline (npr. temperature, vlažnosti, pritiska, itd.), aktuatori su zaduženi za izvršenje radnji kao što su uključivanje ili isključivanje uređaja, otvaranje ili zatvaranje ventila, podešavanje brzine mašina, itd.

Zavisno od funkcije koju izvršavaju, postoji više vrsta aktuatora:

- Električni aktuatori: koriste električnu energiju za pokretanje ili izvršavanje radnje (npr. elektromotor, elektroventil);
- Pneumatski aktuatori: koriste komprimovani vazduh za pokretanje radnje, često korišćeni u industrijskim mašinama;
- Hidraulički aktuatori: koriste pritisak tečnosti za generisanje pokreta, popularni u teškoj industriji;
- Mehanički aktuatori: prebacuju ulazne sile u mehanički pokret, poput poluga i zupčanika.

❖ Kontroleri

Kontroleri u IoT sistemima igraju ključnu ulogu u upravljanju i koordinaciji rada uređaja, senzora i aktuatora. Kontroleri su uređaji ili softverske komponente koje funkcionišu kao centralne lokalne tačke za obradu podataka i izvršavanje komandi, omogućavajući IoT uređajima da efikasno komuniciraju, dijele podatke i reaguju na promjene u okruženju. Oni služe kao “mozak” sistema koji povezuje različite dijelove IoT arhitekture i olakšavaju automatizaciju i donošenje odluka. Primjeri kontrolera:

- Arduino i Raspberry Pi

Ovo su dva najčešće korišćena IoT kontrolera (sl. 6) u razvoju IoT projekata. Arduino je poznat po jednostavnoj upotrebi u kontrolisanju senzora i aktuatora, dok je Raspberry Pi napredniji, omogućavajući kompleksniju obradu podataka i komunikaciju sa Cloud-om.



Slika 6. Arduino i Raspberry Pi

- Programabilni logički kontroleri (PLC)

U industrijskim IoT (IIoT) aplikacijama, PLC-ovi se koriste za kontrolu mašina i proizvodnih procesa. Oni su robusni uređaji dizajnirani za rad u teškim uslovima, i omogućavaju automatizaciju i nadzor u realnom vremenu.

- IoT gateway kontroleri

Gateway kontroleri služe kao veza između RPi, PLC ili Arduino mikrokontrolera i uređaja na ivici mreže i Clouda. Oni prikupljaju podatke sa IoT uređaja, obrađuju ih lokalno (Edge computing) i šalju ih na Cloud za dalju analizu ili skladištenje.

- Smart Home hub-ovi

Ovi kontroleri omogućavaju povezivanje i upravljanje pametnim uređajima u kući, poput pametnih termostata, sijalica, sigurnosnih kamera i drugih uređaja. Primjeri uključuju Google Nest Hub, Amazon Echo i Samsung SmartThings.

❖ Komunikacija

Senzori, aktuatori, industrijske mašine i IoT čvorišta razmjenjuju podatke putem različitih bežičnih komunikacionih protokola, kao što su Wi-Fi, ZigBee, NFC, Bluetooth i RFID [11]. Pored toga, uređaji se mogu povezivati i žičanim načinima komunikacije, kao što su Ethernet, USB, serijski portovi (RS-232/RS-485) i optički kablovi.

❖ Obrada podataka

IoT uređaji kao što su senzori (senzori za mjerenje temperature ili vlažnosti, senzori pokreta, senzori tla ili gasni senzori) ili pametne sigurnosne kamere ili dronovi mogu analizirati prikupljene podatke i obavljati akcije u stvarnom vremenu, često koristeći Cloud computing ili obradu na ivici mreže [12].

❖ Automatizacija i poboljšana efikasnost

IoT tehnologija omogućuje automatizaciju procesa u različitim sektorima, čime se smanjuje potreba za ljudskom intervencijom i poboljšava efikasnost.

2.4 Izazovi razvoja IoT-a

Izazovi IoT-a uključuju sigurnost i privatnost, standardizaciju tehnologija, energetske zahtjeve uređaja, te interoperabilnost među različitim sistemima [13]. IoT uređaji generišu velike količine podataka koje je potrebno skladištiti i obraditi, što predstavlja izazov za današnje centre podataka. IoT generiše ne samo tradicionalne podatke, već i strimovane podatke sa senzora, kamera ili dronova, što zahtjeva napredne alate za analizu u realnom vremenu. IoT uređaji prikupljaju velike količine podataka o korisnicima, što izaziva zabrinutost za privatnost. Preduzeća moraju osigurati bezbjednost ovih podataka kako bi zaštitila korisnike i same sisteme. Kako broj IoT uređaja raste, tako raste i broj potencijalnih sigurnosnih rizika, uključujući sajber napade. Sigurnosni sistemi moraju biti unaprijeđeni kako bi se IoT mreže zaštitile.

Brzi napredak IoT tehnologija povećava rizik od haosa usljed neadekvatno projektovanih sistema. Standardizacija i pažljivo planiranje ključni su za smanjenje složenosti i osiguranje bezbjednosti sistema. Prilikom dizajniranja IoT rješenja, posebno je važno obratiti pažnju na sljedeće ključne komponente: hardver, mrežno povezivanje sa Cloud okruženjem, dizajniranje aplikacija, analiza podataka, bezbjednost, vještačka inteligencija (AI).

❖ Hardver

Hardverski uređaji su osnovna komponenta IoT sistema. U svijetu trenutno postoji između 50 i 100 milijardi međusobno povezanih uređaja, opremljenih senzorima i aktuatorima koji reaguju na spoljnu sredinu i omogućavaju kontrolu [14]. Osim komunikacionih modula, ovi uređaji moraju imati osnovne kapacitete za procesiranje i skladištenje podataka, što omogućavaju ugrađeni mikrokontroleri ili integrisana kola.

❖ Mrežno povezivanje i integracija sa Cloud okruženjem

Mrežna infrastruktura i njen dizajn važni su za funkcionisanje IoT tehnologija, jer omogućavaju prenos velike količine podataka sa brojnih uređaja putem različitih mrežnih uređaja. Pravilno planiranje mrežne infrastrukture je stoga od suštinskog značaja.

❖ Dizajniranje aplikacija

Web i mobilne aplikacije omogućavaju korisničke interfejse za pristup i korišćenje podataka sa IoT uređaja. Posebno su korisne tehnologije zasnovane na prepoznavanju glasa i pokreta, koje se sve češće primjenjuju u kućnim uređajima. Aplikacije se razvijaju u programskim jezicima kao što su Java, Swift, i Node.js, a posebno se vrednuju vještine za razvoj aplikacija sa GPS funkcijama, s obzirom na to da mnogi IoT uređaji, poput pametnih satova i vozila, zahtjevaju praćenje lokacije.

❖ Analiza podataka

Kako broj IoT uređaja konstantno raste, tako raste i količina podataka koju generišu. Koncept Big Data postaje ključan, jer zahtjeva pravilno skladištenje, pretragu i filtriranje podataka, uz prioritizaciju važnijih informacija. Neke od osnovnih tehnologija koje developeri koriste za analizu podataka uključuju Hadoop, Spark i NoSQL baze podataka.

❖ Bezbjednost

Bezbjednost je jedan od najvažnijih aspekata IoT sistema. Sa sve većim brojem IoT uređaja, zaštita podataka postaje prioritet, što zahtjeva visok nivo odgovornosti kako sa tehnološke, tako i sa etičke strane.

❖ Vještačka inteligencija (AI)

Vještačka inteligencija sve više igra ključnu ulogu u IoT tehnologijama zahvaljujući svojoj sposobnosti da obradi i analizira ogromne količine podataka, omogućavajući donošenje brzih i preciznih odluka, automatsku optimizaciju procesa i prediktivnu analitiku. Inteligentni algoritmi zasnovani na tehnikama kao što su rudarenje podataka, modeliranje, statistika i mašinsko učenje koriste se za prediktivne analize i donošenje odluka u realnom vremenu, ali i za analizu istorijskih podataka radi otkrivanja obrazaca ili nepravilnosti. Na taj način vještačka inteligencija postaje primijenjena tehnologija u rješavanju mnogih zahtjevnih zadataka iz svakodnevnog života, kojima druge tehnologije jednostavno nisu dorasle [15].

2.5 Industrijski Internet of Things (IIoT)

Industrija 4.0 predstavlja četvrtu industrijsku revoluciju, obilježenu integracijom digitalnih tehnologija, automatizacije i novih poslovnih modela u tradicionalne industrijske procese. U centru ove revolucije nalazi se Internet stvari (IoT), tehnologija koja omogućava povezivanje uređaja, mašina i sistema putem interneta, omogućavajući im da međusobno komuniciraju i razmjenjuju podatke.

Industrijski Internet stvari (IIoT) razvio se kao nadogradnja IoT-a, usmjerena na industrijske primjene. Ključna razlika između IoT-a i IIoT-a leži u njihovoj namjeni, dok se IoT primarno bavi olakšavanjem svakodnevnog života korisnika, IIoT ima za cilj unapređenje efikasnosti, sigurnosti i produktivnosti u industrijskim procesima, s naglaskom na ekonomske koristi. Ove koristi obuhvataju širenje investicija, povrat ulaganja, proračune u realnom vremenu i praćenje tržišnih parametara, kao i druge vrijednosne aspekte. Industrijski IoT kao specifična primjena IoT

tehnologija favorizovan je od strane vodećih tehnoloških kompanija [16]. Kompanije mogu koristiti IIoT za efikasno praćenje i upravljanje lancem snabdijevanja, vršenje kontrole kvaliteta, što dovodi do ukupne uštede novca i vremena, te smanjuje ukupnu potrošnju energije. IoT je mnogo više baziran na relacijama čovjek – uređaj, dok je IIoT fokusiran na relacije uređaj – uređaj odnosno mašina – mašina (ovaj koncept je poznat od ranije kao M2M), i generalno govoreći, na relacijama uređaj – čovjek – uređaj – objekat – transport – infrastruktura [17]. Industrijski IoT predstavlja proširenje tradicionalnog IoT koncepta na industrijske oblasti, kao što su proizvodnja, energetika, transport, logistika i poljoprivreda.

Termin Industrijski Internet je prvi put uveo General Electric (GE) kao izraz za Industrijski Internet stvari (IIoT). Ova tehnologija je usmjerena na industrijske sektore, uključujući proizvodnju, energetiku, poljoprivredu, zdravstvenu njegu i transport, i razlikuje se od potrošačkog IoT-a, koji se koristi u pametnim domovima i ličnoj tehnologiji [18].

IIoT omogućava bolji uvid u operacije i imovinu kompanija putem integracije senzora, aktuatora, softvera, srednjeg sloja i sistema za skladištenje i obradu podataka u Cloud-u. Ova tehnologija donosi operativne efikasnosti i smanjuje neplanirane zastoje, dok povećava produktivnost i smanjuje operativne troškove. Razvoj IIoT-a se ubrzao zbog napretka u tehnologijama poput Big Data analitike, Cloud computing-a i smanjenja cijena senzora i skladištenja podataka. Ove tehnologije su postale pristupačnije, omogućavajući širu primjenu u industriji. IIoT donosi značajne uštede u industrijskim sektorima. IIoT zahtijeva razvoj naprednih sistema za sajber sigurnost, jer veliki broj povezanih uređaja predstavlja potencijalne sigurnosne rizike.

Na osnovu današnjih trendova i projektovanih budućih kretanja i razvoja IIoT-a, treba očekivati ubrzan razvoj i značajne tehnološke prodore u oblastima koje definišu “pametne energetske, industrijske i urbane sredine” [19], kroz niz pojmova kao što su: pametni gradovi, pametne zgrade, pametne fabrike, pametne elektrane, pametni obnovljivi izvori energije, pametni aerodromi, pametna vozila, pametna poljoprivreda, pametni prenosivi uređaji (mobilni telefoni, laptotopovi, tablet računari) i dr.

Ključne komponente IIoT sistema uključuju:

- Senzori i aktuatori – ovi uređaji prikupljaju podatke iz fizičkog svijeta, kao što su temperatura, vlažnost, pritisak, vibracije, itd.
- Povezanost (konektivnost) – mrežne tehnologije poput 5G, Wi-Fi, Bluetooth, LoRa omogućavaju povezivanje uređaja s internetom.
- Edge computing – obrada podataka blizu izvora, smanjujući kašnjenje i optimizujući performanse.
- Softverska platforma – Platforme za analizu podataka, vizualizaciju i upravljanje uređajima.
- Cyber sigurnost – Osiguravanje podataka i uređaja od potencijalnih napada ili zloupotreba.

2.6 Pametna poljoprivreda

Za proizvodnju hrane koja može zadovoljiti potrebe čovječanstva, neophodno je postići ravnotežu između povećanja prinosa, očuvanja kvaliteta proizvoda i održivog korišćenja prirodnih resursa, uz primjenu ekološki odgovornih i tehnološki naprednih metoda. Pored toga, sposobnost praćenja prehrambenih proizvoda od proizvodnje preko prerade, skladištenja i maloprodaje pruža dodatnu mogućnost za reagovanje na promjene tržišnih uslova, obezbjeđivanje adekvatne ishrane i bezbjednosti hrane, kao i uticaj na nacionalne i međunarodne politike vezane za sigurnost u hrani [20].

Koncept pametne poljoprivrede obuhvata upotrebu naprednih tehnologija i digitalnih alata za optimizaciju poljoprivrednih aktivnosti, povećanje produktivnosti i smanjenje negativnog uticaja na životnu sredinu. Ova moderna praksa koristi tehnologije kao što su Internet stvari (IoT), vještačka inteligencija (AI) i Big Data analitika kako bi se poljoprivrednicima omogućilo precizno upravljanje resursima i donošenje odluka zasnovanih na podacima.

Automatizacija poljoprivredne proizvodnje odnosi se na primjenu tehnologija i sistema koji omogućavaju da se poljoprivredni zadaci obavljaju uz minimalnu direktnu intervenciju čovjeka ili bez nje. Cilj automatizacije je povećanje efikasnosti, produktivnosti i preciznosti, smanjenje troškova i optimizacija upotrebe resursa u poljoprivredi.

2.6.1. Elementi pametne poljoprivrede

❖ Precizna poljoprivreda

Precizna poljoprivreda odnosi se na sistemski pristup upravljanju proizvodnjom koji koristi napredne tehnologije za praćenje, mjerenje i analiziranje (vlažnost, nutritivne vrijednosti), klimatskih uslova zemljišta i stanja usjeva u realnom vremenu radi optimizacije poljoprivrednih praksi i povećanja prinosa [21] [22].

❖ IoT tehnologije

Pametni senzori i uređaji koriste se za prikupljanje podataka iz polja i sa stočarskih farmi. Ovi senzori prate parametre kao što su temperatura, vlažnost, osvjetljenje, nivo CO₂, zdravstveno stanje životinja, a zatim šalju podatke kontrolnim sistemima za dalju analizu i automatsko upravljanje.

❖ Dronovi i autonomna vozila

Dronovi se koriste za pregled polja, praćenje stanja usjeva i mapiranje zemljišta (sl. 7). Autonomna vozila poput traktora mogu se koristiti za automatizaciju zadataka kao što su oranje, sjetva i žetva.



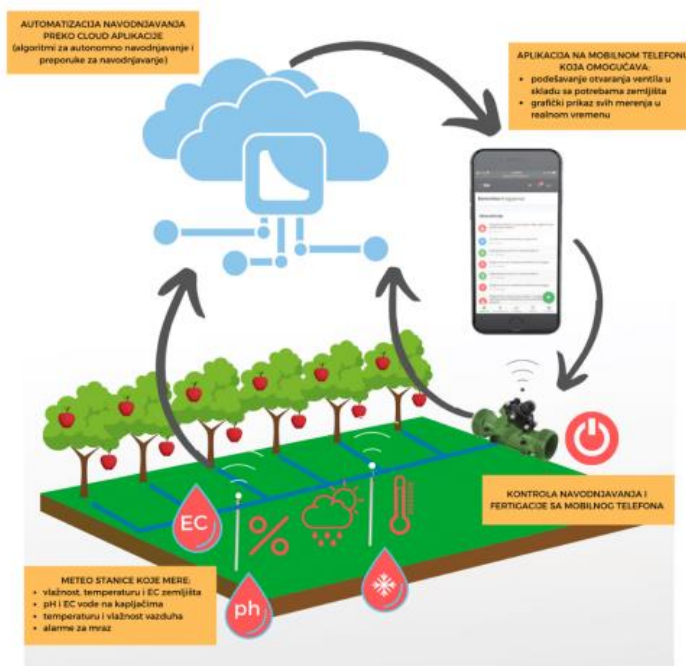
Slika 7. Dron

❖ Big data i analitika

Primjena Big Data tehnologija u poljoprivredi predstavlja trend, sa velikim potencijalom za ulaganje i unapređivanje vrijednosti u poljoprivredno-prehrambenom sektoru. Big Data aplikacije nisu ograničene samo na primarnu proizvodnju, već igraju važnu ulogu u poboljšanju efikasnosti cijelog lanca snabdijevanja i rješavanju problema bezbjednosti hrane. Tehnologija omogućava upotrebu senzora, prediktivnog modeliranja i analize kako bi se upravljalo rizikom od propadanja usjeva i povećala efikasnost. Promjene koje donosi Big Data aplikacije u pametnoj poljoprivredi pokreću faktori potražnje i tehnološkog razvoja. Sa jedne strane, farmeri traže načine za smanjenje troškova i poboljšanje efikasnosti, dok sa druge strane, nova tehnologija omogućava postizanje viših ciljeva. Očekuje se da će rast broja agrotehničkih kompanija dodatno ubrzati ovu tehnologiju, mijenjajući strukturu i organizaciju poljoprivrede na načine koje tek treba istražiti [23].

❖ Automatizovani sistemi za navodnjavanje i đubrenje

Na osnovu podataka o vlažnosti zemljišta i nutritivnim potrebama biljaka, automatski sistemi mogu kontrolisati navodnjavanje (sl. 8) i primjenu đubriva, smanjujući potrošnju vode i hemikalija.



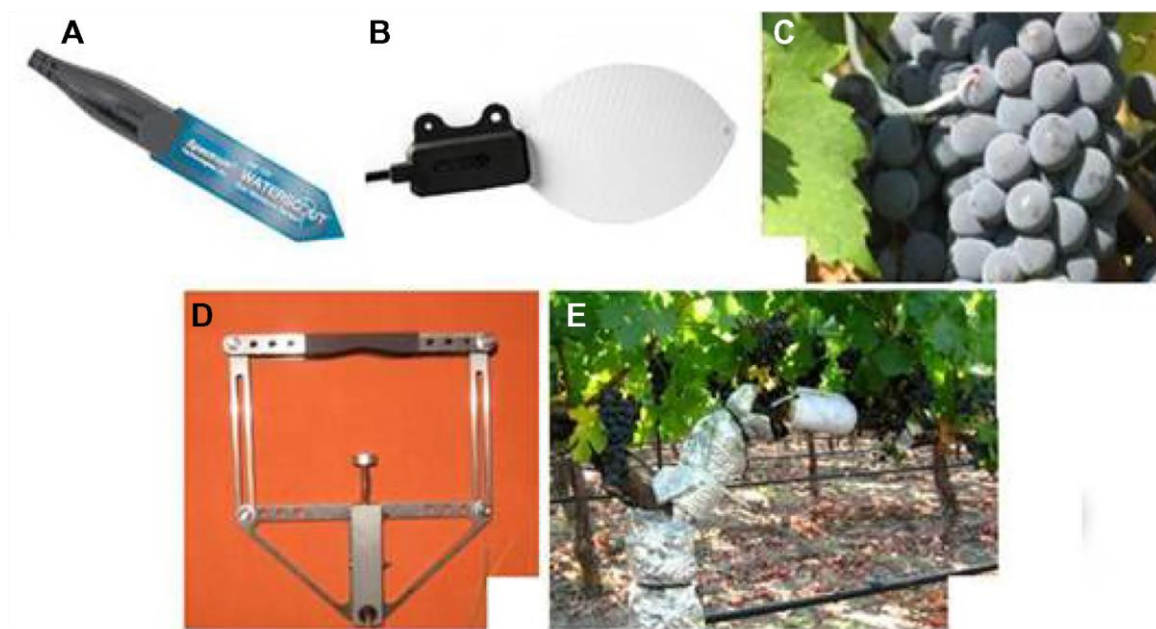
Slika 8. Pametno navodnjavanje – <https://www.agromedia.rs/agro-teme/vocarstvo/digitalno-navodnjavanje-efikasno-stedi-novac-i-vreme/>

2.6.2. Primjena IoT tehnologije u vinogradarstvu

Koncept pametnih vinograda primjenjuje se za optimizaciju performansi vinograda, posebno za maksimiziranje prinosa i kvaliteta grožđa uz minimiziranje uticaja i rizika na životnu sredinu [24], mjerenjem lokalnih varijacija u faktorima koji utiču na njih (plodnost i sastav zemljišta, nagib terena, nadmorska visina, orijentacija vinograda, mikroklima, zdravlje vinove loze) kao i primjenom odgovarajućih praksi upravljanja vinogradarstvom [25] [26]. Pametni vinogradi su zasnovani na pretpostavci da u njima postoji visoka varijabilnost faktora koji utiču na rast vinove loze i sazrijevanje grožđa, i zavise od novih tehnologija kao što su sistemi za globalno pozicioniranje (GPS), pametno navodnjavanje [27], meteorološki i drugi senzori životne sredine, satelitsko i vazdušno daljinsko ispitivanje, geografski informacioni sistemi (GIS) za procjenu i reagovanje na te faktore.

Tradicija proizvodnje vina je veoma duga, a kultura vina se proširila širom svijeta. Tokom vremena, tehnike proizvodnje vina su evoluirale. Pametni vinogradi predstavljaju koncept korištenja IoT tehnologija za unapređivanje efikasnosti, produktivnosti i održivosti u vinogradarstvu.

Metodom proksimalnog senzorisanja (sl. 9), prikupljaju se podaci o okolini ili objektima putem senzora koji su postavljeni blizu površine koja se analizira, ali bez direktnog kontakta sa njom. Pomoću automatizovanih sistema i analitičkih alata vinogradari mogu precizno upravljati svim aspektima gajenja vinove loze, od sadnje do berbe.



Slika 9. Neki senzori koji se koriste u bežičnim senzorskim mrežama za proksimalno senzorisanje u vinogradima – Vlažnost zemljišta (Spectrum Technologies Aurora, IL, SAD). (B) Vlažnost lista (Decagon Devices Inc., Pullman, WA, SAD). (C) Temperatura grožđa i (D) dendrometar (GMR Strumenti SAS Scandicci, Italija). (E) Protok soka (Fruition Sciences Inc., Montpellier, Francuska)

Ključni aspekti pametnih vinograda

- Monitoring i kontrola mikroklimatskih uslova – senzori u vinogradu prate mikroklimatske uslove, uključujući temperaturu, vlažnost vazduha i zemljišta, te intenzitet sunčeve svjetlosti. Ovi podaci omogućavaju optimizaciju navodnjavanja, zaštitu od mraza i određivanje optimalnog vremena za berbu.
- Automatizovano navodnjavanje – sistemi za automatizovano navodnjavanje koriste podatke sa senzora za precizno određivanje kada i koliko vode je potrebno. To doprinosi očuvanju vode i održavanju optimalnog nivoa vlažnosti za rast vinove loze.
- Dronovi i satelitske slike – dronovi opremljeni kamerama prelijeću vinograd i snimaju visokorezolucijske slike za praćenje zdravlja biljaka, detekciju bolesti ili nedostatka hranljivih

materija. Satelitske slike omogućavaju širi uvid u vinograd i identifikaciju varijacija u uslovima unutar vinograda.

- Roboti i automatizovana oprema – roboti se koriste za obavljanje repetitivnih zadataka poput orezivanja, čišćenja i berbe. Oni omogućavaju efikasnije obavljanje radova i smanjuju potrebu za manuelnim radom.
- Prediktivna analitika – primjena vještačke inteligencije (AI) i mašinskog učenja na prikupljene podatke omogućava predviđanje roda, kvaliteta grožđa i potencijalnih problema kao što su bolesti ili štetočine. Ove analize omogućavaju proaktivno donošenje odluka i optimizaciju prinosa.
- Upravljanje lancem snabdijevanja – IoT tehnologije prate grožđe i vino kroz sve faze proizvodnje, od vinograda do krajnjeg potrošača, čime se poboljšava transparentnost, efikasnost i kvalitet konačnog proizvoda.

Implementacija IoT tehnologija u vinogradarstvu predstavlja značajan korak ka modernizaciji i unapređivanju proizvodnje vina. Na ovaj način, vinogradarstvo postaje spremno da se suoči sa izazovima moderne poljoprivrede i promjenljivim uslovima tržišta, istovremeno očuvavajući kvalitet i tradiciju proizvodnje vina.

2.6.3. Primjene IoT tehnologije u proizvodnji vina

Proizvođači vina se suočavaju sa mnogim problemima izazvanim klimatskim promjenama, nedostatkom radne snage i rastućim troškovima proizvodnje [28].

Automatizacija vinograda i vinifikacija je ključni aspekt koji vodi ka poboljšanju kvaliteta, produktivnosti i povećanju profita. Pametne vinarije podrazumijevaju upotrebu IoT tehnologija u svim procesima od trenutka dopremanja zrelog grožđa u vinariju do trenutka kada je vino spremno za komercijalnu upotrebu [29]. IoT tehnologija se primjenjuje i u procesu fermentacije i same proizvodnje vina, omogućavajući preciznu kontrolu temperature, praćenje nivoa šećera i kiselosti, te automatizaciju ključnih procesa. Primjenom IoT u praćenju temperature fermentacije postiže se kontrola kvaliteta, daljinski nadzor i automatizacija procesa proizvodnje [30], i na taj način se omogućuje kombinovanje stručnog znanja s podacima dobijenim od senzora u realnom vremenu [31]. Kontrola temperature je ključna za optimalan rad kvasaca, koji utiču na razvoj arome, ukusa

i kvaliteta vina. Precizno regulisanje temperature omogućava proizvođačima da spriječe neželjene promjene u fermentaciji koje mogu uticati na profil vina.

IoT tehnologija može automatski prilagođavati uslove fermentacije na osnovu prikupljenih podataka, poput automatskog hlađenja ili grijanja fermentacionih posuda kako bi se održala optimalna temperatura.

IoT senzori u vinogradu prate nivo šećera, kiselost i druge parametre sazrijevanja grožđa. Na osnovu ovih podataka, proizvođači mogu odrediti najbolji trenutak za berbu, čime se postiže optimalan balans ukusa i arome.

Na osnovu podataka prikupljenih tokom fermentacije, IoT sistem može automatski dodavati hranljive materije i druge aditive kako bi se optimizovao rad kvasaca i održao kvalitet fermentacije.

Kontrola nivoa kiseonika je važna tokom fermentacije. Previše ili premalo kiseonika može negativno uticati na kvalitet vina. IoT senzori omogućavaju praćenje i kontrolu oksigenacije u fermentacionim posudama.

IoT senzori mogu pratiti temperaturu, vlažnost i druge uslove u podrumima ili skladištima gdje vino odležava. Ovi podaci pomažu u održavanju stabilnih uslova zrenja, što je ključno za postizanje željenog kvaliteta vina.

IoT sistemi mogu automatski regulisati ventilaciju i kontrolisati vlažnost kako bi se spriječilo stvaranje plijesni i drugih neželjenih efekata tokom zrenja.

Integracija IoT sa mašinama za punjenje boca omogućava precizno i efikasno flaširanje, smanjujući gubitke i osiguravajući postojanost kvaliteta proizvoda.

IoT može pratiti i optimizirati upotrebu resursa kao što su voda i energija, te pomoći u efikasnijem upravljanju otpadom iz proizvodnje vina. Na primjer, senzori mogu pratiti ispuštanje otpadnih voda i osigurati da je tretman otpadnih materija ekološki održiv. IoT omogućava praćenje i dokumentovanje svih faza proizvodnje vina, što pomaže u održavanju standarda kvaliteta i usklađivanju sa regulatornim zahtjevima. Ako senzori detektuju odstupanja od definisanih standarda kvaliteta (npr. prekomjerna temperatura), sistem može automatski reagovati i obavijestiti operatere kako bi se brzo sprovela korektivna akcija.

IoT tehnologija u svim fazama proizvodnje vina, od vinograda do flaširanja, omogućava proizvođačima da precizno upravljaju procesima, poboljšavaju kvalitet, optimizuju resurse i smanjuju operativne troškove. Monitoring nad svim fazama proizvodnje vina omogućava blagovremeno reagovanje na sve nepravilnosti detektovane senzorima različitog tipa i pokretanje

odgovarajućih aktuatora koji mogu u kratkom vremenskom periodu spriječiti negativne posljedice uočenih nepravilnosti. Na ovaj način, IoT ne samo da podržava održivost i efikasnost u proizvodnji vina, već i pomaže proizvođačima da odgovore na sve veće zahtjeve tržišta za kvalitetnim i ekološki prihvatljivim proizvodima.

3. Tradicionalni proces proizvodnje crvenog vina

Vinarstvo je “umjetnost” i nauka o proizvodnji vina, koja se razvijala hiljadama godina i postala jedan od najvažnijih djelova kulturnog i poljoprivrednog nasljeđa širom svijeta. U ovom radu, fokus je na tradicionalnoj proizvodnji crvenog vina, proces koji uključuje pažljivo korišćenje tradicionalnih metoda i minimalnu intervenciju tehnologije kako bi se očuvali prirodni mirisi i ukusi grožđa i jedinstvene karakteristike podneblja koje se ogledaju u ukusu vina (terroira-a).

3.1 Opis procesa proizvodnje vina

Proces proizvodnje vina sastoji se od nekoliko ključnih koraka gdje se, uz pomoć kvasaca, transformiše šećer iz grožđa u alkohol i dobija vino sa bogatim ukusom i aromom. Ovaj proces uključuje sljedeće faze:

❖ Berba i muljanje grožđa

Tradicionalna proizvodnja crvenog vina počinje pažljivom ručnom berbom grožđa (sl. 10). Ovaj metod omogućava vinogradarima da pažljivo odaberu samo najzdravije i najzrelije grožđe, dok izbjegavaju prezrele ili oštećene bobice. Berba se često obavlja u ranim jutarnjim satima, kako bi se očuvala svježina grožđa. Kvalitet grožđa je ključan jer direktno utiče na krajnji kvalitet vina.



Slika 10. Berba grožđa na Oglednom imanju “Lješkopolje”

Jedan od najupečatljivijih aspekata tradicionalne proizvodnje crvenog vina je muljanje (gnječenje) grožđa, koje se u nekim regionima još uvek obavlja ručnim muljačama. Ovaj proces omogućava blago muljanje bobica, dok se pokožica i sjemenke miješaju sa sokom. Pokožica je ključna jer sadrži pigmente (antocijane) koji daju crvenom vinu njegovu boju, kao i tanine koji utiču na strukturu i dugovječnost vina. Grožđe se obično odvaja od peteljki, bobice se gnječe, a svježe dobijeni kljuk se prenosi u uređaj za fermentaciju pomoću pumpe [32].

Muljanjem grožđa oslobađa se sok, čime se formira kljuk. Tada se mogu dodati određeni enzimi za poboljšanje ekstrakcije boje i aroma, posebno kod crvenih vina.

❖ Alkoholna fermentacija

Alkoholna fermentacija, tj. vrenje kljuka, predstavlja jednu od osnovnih faza u procesu proizvodnje vina. Fermentacija je biohemijski i fizičko-hemijski proces pretvaranja ugljenih hidrata (šećera) u alkohol, pri čemu se oslobađa CO₂. U tradicionalnoj proizvodnji, fermentacija se često obavlja u drvenim bačvama ili sudovima za fermentaciju, bez dodataka komercijalnih kvasaca, oslanjajući se isključivo na divlje kvasce prisutne na pokožici grožđa. Fermentacija se odvija na relativno visokim temperaturama, obično između 25 °C i 28 °C, što pomaže u ekstrakciji boje i tanina iz kože, stvarajući bogato i kompleksno vino.

Postoje dvije glavne vrste fermentacije: intenzivna ili “burna” i tzv. “tiha” fermentacija.

U burnoj fermentaciji prva dva do tri dana raste biomasa kvasca koja je potrebna za razgradnju šećera. Temperatura kljuka raste, oslobađa se CO₂ koji podiže klobuk i stvara se pjena. Istovremeno se smanjuje sadržaj šećera i povećava sadržaj alkohola. Trajanje burne fermentacije zavisi od sadržaja šećera u kljuku, temperature i drugih faktora i traje oko 5 – 8 dana.

Nakon burne fermentacije, kada se vino otoči, nastupa tzv. “tiha” fermentacija, gdje se ostala količina šećera dodatno razgrađuje. Zbog povećanog sadržaja alkohola, aktivnost kvasca opada, neke ćelije odumiru (20 – 30%) i dolazi do njihove autolize. Trajanje tihog vrenja zavisi od količine neprevrelog šećera (2 – 3 nedjelje).

U proizvodnji crvenog vina, fermentacija i maceracija često se odvijaju uporedo. Ovo je posebno važno za crveno vino, jer dok kvasci fermentišu šećer u alkohol, sok je u kontaktu sa pokožicama i sjemenkama grožđa, što omogućava ekstrakciju boje, tanina i aroma.

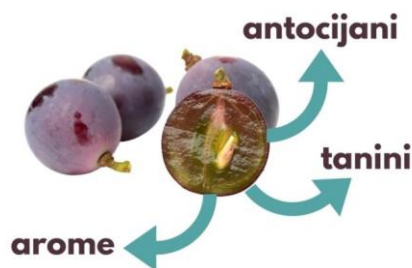
Kada se grožđe gnječi i dodaje selekcionisani kvasac (ili prirodni kvasci počnu raditi), fermentacija počinje. U isto vrijeme, pokožice grožđa i sjemenke su još uvek u kontaktu sa sokom, pa maceracija započinje istovremeno.

Dok se šećer pretvara u alkohol, alkohol pomaže u ekstrakciji fenolnih jedinjenja (boje i tanini) iz pokožice i sjemenki. Više alkohola znači bolju ekstrakciju, pa se intenzitet boje i tanina povećava kako fermentacija napreduje.

Kada se fermentacija bliži kraju i sav šećer je gotovo pretvoren u alkohol, vinari mogu odlučiti da produže maceraciju kako bi iz sjemenki i pokožica izvukli dodatne tanine i arome. Ovaj proces se naziva produžena maceracija i može trajati i nakon što fermentacija završi.

Alkohol koji nastaje tokom fermentacije pomaže u ekstrakciji fenolnih jedinjenja (boje, tanina, aroma) iz pokožice i sjemenki (sl. 11), pa je korisno da se ovi procesi odvijaju zajedno.

Maceracija je ključna za crveno vino jer omogućava da vino dobije svoju karakterističnu boju i strukturu, dok fermentacija obezbjeđuje alkohol koji je neophodan za stabilnost i konzervaciju vina.



Slika 11. Produkti maceracije

Fermentacija doprinosi različitim aspektima kvaliteta vina, od kojih su najvažniji:

- Aroma i ukus
- Struktura vina
- Boja vina
- Alkoholni sadržaj
- Kiselost i pH vrijednost
- Mikrobiološka stabilnost i dugovječnost
- Malolaktična fermentacija (MLF).

Fermentacija je ključni proces koji u velikoj mjeri oblikuje konačni karakter i kvalitet vina. Pravilna kontrola temperature, nivoa kiseonika, pH vrijednosti, koncentracije šećera i drugih faktora tokom fermentacije ključna je za postizanje željenog profila vina i sprečavanje problema poput neželjenih aroma ili mikrobiološkog kvarenja. Razumijevanje i precizno upravljanje fermentacijom je temelj za proizvodnju visokokvalitetnih vina sa bogatim i uravnoteženim ukusom, stabilnošću i potencijalom za starenje.

Upotreba IoT sistema u ovom procesu omogućava vinarima precizno praćenje i upravljanje ovim parametrima u realnom vremenu, automatsko podešavanje uslova fermentacije i pravovremenu reakciju na odstupanja. IoT senzori i uređaji obezbjeđuju kontinuirano prikupljanje podataka, njihovu analizu putem algoritama i daljinsko upravljanje procesom, čime se poboljšava konzistentnost kvaliteta vina, smanjuju gubici i optimizuju resursi.

❖ Otakanje vina

Nakon burne fermentacije pristupa se otakanju tečnog dijela – odvajanju vina od komine i smještanja u posebne sudove, gdje se nastavlja proces tihog vrenja i doviranja. Čvrsti ostaci grožđa (pokožica i sjemenke) se odvajaju od tečnosti pomoću pumpi za otakanje vina. Ovaj proces se obavlja pažljivo kako bi se izvukao sav preostali sok, ali bez ekstrakcije gorčine iz sjemenki ili peteljki (sl. 12).



Slika 12. Groždani kljuk – <https://www.smartwinemaking.com/post/2017/06/30/fermentation-temperature-for-wine>

❖ Njega i dorada vina

Nakon završetka alkoholnog vrenja i razlivanja u sudove dobija se poluproizvod – vino. Ovakvo vino zahtijeva određene pripreme za dobijanje kvalitetnog vina, što podrazumijeva da se u daljem procesu vrši njega ovog vina. Pod njegom i doradom vina podrazumijeva se dolivanje sudova, pretakanja, stabilizacija, bistrenje, filtriranje i flaširanje vina.

Odležavanje može trajati od nekoliko mjeseci do nekoliko godina, zavisno od tipa vina. Odležavanje vina može biti u inoks sudovima ili drvenim bačvama (sl.13 i sl. 14). Tradicionalno, bačve se čuvaju u podrumima sa stabilnom temperaturom i vlažnošću, omogućavajući vinu da sazri. Tokom ovog procesa, vino razvija kompleksnije arome i ukuse.



Slika 13. Bačve za odležavanje vina



Slika 14. Inoks sudovi na Oglednom imanju “Lješkopolje”

Nakon završetka perioda odležavanja, vino se filtrira i flašira. Tradicionalna vina se često flaširaju sa minimalnim filtriranjem, što znači da zadržavaju svoje prirodne arome i teksturu. U nekim slučajevima, vino se i dalje razvija u boci, postajući složenije i bogatije tokom vremena. Prije flaširanja, vino se često filtrira kako bi se uklonile čestice koje mogu uticati na bistrinu i stabilnost. Nakon filtracije, vino se flašira, a zatim čuva do konzumacije.

Iako je vino već “završeno” kada se flašira, mnoga vina se dalje razvijaju i poboljšavaju sa vremenom dok odležavaju u boci. Proces sazrijevanja u boci može trajati od nekoliko mjeseci do nekoliko decenija, zavisno od stila i strukture vina.

3.2 Faktori koji utiču na proces fermentacije

❖ Temperatura fermentacije

Kontrola temperature tokom fermentacije, ključna je za proizvodnju visokokvalitetnih vina. Performanse kvasca za pretvaranje kljuka u etanol direktno su povezane sa temperaturom fermentacije, jer kvasac može optimalno funkcionisati samo u odgovarajućem temperaturnom okruženju. Optimalna temperatura za rehidrataciju kvasca je oko $30\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, dok je za rast kvasca optimalna temperatura između $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $28\text{ }^{\circ}\text{C}$. Niže temperature usporavaju aktivnost kvasca, omogućavajući bakterijama ili divljem kvascu da iskoriste nepovoljno okruženje. Više temperature ubrzavaju starenje kvasca i rast bakterija, što rezultira nepoželjnim nusproduktima [33]. Dakle, temperatura fermentacije direktno, preko procesa fermentacije, utiče na kvalitet vina [34] [35].

Temperatura direktno utiče i na aktivnost glukoamilaze, enzima ključnog za razgradnju šećera. Niže temperature inhibiraju aktivnost enzima, što produžava fermentacione cikluse i smanjuje produktivnost. Više temperature povećavaju osmotski pritisak u fermentoru, utičući negativno na rast kvasca.

Optimalna temperatura za fermentaciju je između $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $28\text{ }^{\circ}\text{C}$, pri čemu viša temperatura ubrzava proces fermentacije. Međutim, kada temperatura pređe $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, produktivnost etanola opada, dok se povećava proizvodnja glicerola. Visoke temperature takođe povećavaju toksičnost etanola, inhibirajući kvasac.

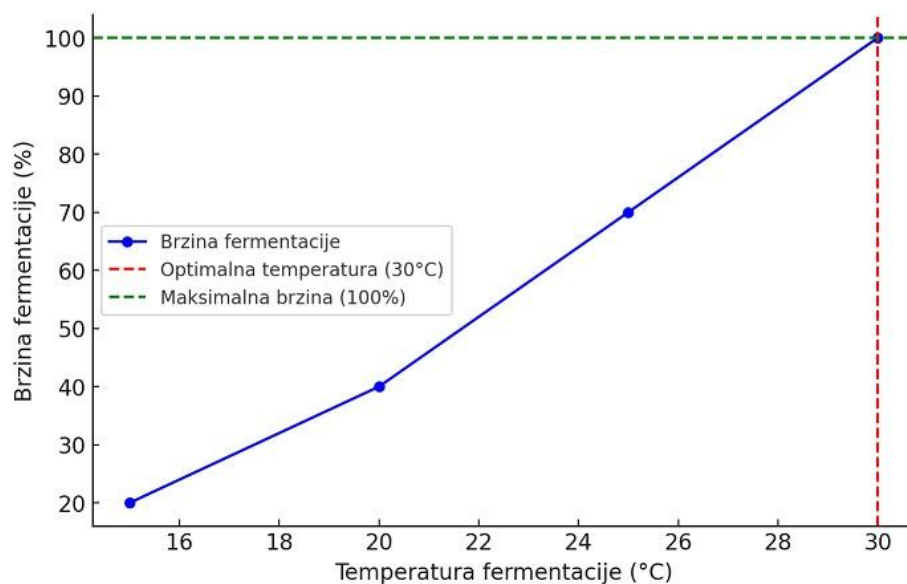
Formula za zavisnost brzine fermentacije od temperature može se izražavati kroz Arenijusovu jednačinu (1):

$$k=A \cdot e^{-E_a/RT} \quad (1)$$

gdje k predstavlja brzinu reakcije (fermentacije), A je preeksponencijalni faktor koji je konstanta za datu hemijsku reakciju i odnosi se na učestalost sudara čestica, E_a je energija aktivacije (obično je izražena u J/mol), R je univerzalna gasna konstanta čija je vrijednost 8.314 J/mol·K i T je apsolutna temperatura u Kelvinima [36].

Brzina fermentacije se značajno smanjuje kako temperatura opada, što utiče na smanjenje stope konverzije šećera u etanol. Na temperaturi od 15 °C fermentacija je najsporija i produkcija etanola je minimalna, dok se najviša produkcija etanola bilježi na 30 °C.

Korišćenjem Arenijusove jednačine, aktivaciona energija za fermentaciju slobodnih ćelija izračunata je na 108,9 kJ/mol. Ova vrijednost ukazuje na energiju potrebnu za pokretanje procesa fermentacije i na to da temperature bliže optimalnim (30 °C) omogućavaju efikasniji proces [37]. Grafik 1 pokazuje da se brzina fermentacije povećava sa temperaturom i dostiže maksimum na 30 °C, što je optimalna temperatura fermentacije kvasca *Saccharomyces cerevisiae*.



Grafik 1. Zavisnost brzine fermentacije od temperature

Promjene u temperaturi fermentacije, koje mogu biti rezultat nepovoljnih uslova u toku fermentacije, značajno utiču na hemijske karakteristike i organoleptički profil vina, što može dovesti do promjena u strukturi i kvalitetu budućih vina.

Neka istraživanja pokazala su da temperatura fermentacije ima uticaj na enološke parametre i isparljiva jedinjenja u vinu korišćenjem dvije vrste kvasca: *Saccharomyces cerevisiae* LALVIN CY3079 i UVAFERM WAM. Ispitivane su temperature 16 °C, 20 °C i 27 °C, te kako one utiču na fermentaciju, pH vrijednost, šećere, mikrobiološku populaciju, kao i opšte enološke parametre kao što su sirćetna, limunska, jabučna, mliječna, ćilibarna kiselina, amonijum azot, amonijum i glicerol na početku i kraju fermentacije. Takođe su analizirani etanol i isparljiva jedinjenja na kraju fermentacije. Rezultati su pokazali da većina osnovnih enoloških parametara i isparljivih jedinjenja varira u zavisnosti od temperature fermentacije [38].

Uloga temperature u procesu vrenja grožđa za proizvodnju vina je kritična i može značajno uticati na kvalitet i karakteristike konačnog proizvoda.

Više temperature obično povećavaju brzinu fermentacije, što može dovesti do bržeg završetka procesa. Međutim, previše brza fermentacija može rezultirati gubitkom nekih aromatskih jedinjenja.

Kontrolisana fermentacija omogućava proizvodnju vina visokog kvaliteta i podrazumijeva pažljivu kontrolu temperature kako bi se osigurao sporiji i postepeniji proces fermentacije, što doprinosi razvoju kompleksnijih aroma i boljoj integraciji komponenti.

Temperatura može uticati na formiranje estera i drugih isparljivih jedinjenja koji doprinose aromi vina. Niže temperature fermentacije često rezultiraju vinima sa više voćnih i cvjetnih aroma.

Temperature tokom i nakon fermentacije mogu uticati na hemijsku stabilnost vina, uključujući boju i taloženje tanina, posebno u crvenim vinima. Kontrola temperature može pomoći u sprječavanju rasta neželjenih mikroorganizama koji mogu uzrokovati kvarenje vina.

Kontrola temperature je, dakle, ključni faktor u proizvodnji vina, omogućavajući vinarima da utiču na karakteristike vina i postignu željeni kvalitet. Savremene tehnike i oprema, uključujući fermentacione sudove sa kontrolom temperature (vinifikatori), omogućavaju preciznu kontrolu ovog važnog faktora tokom cijelog procesa fermentacije.

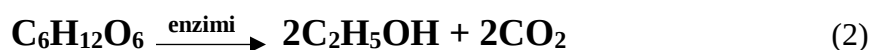
❖ Količina šećera

Šećer je ključni supstrat tokom fermentacije, jer služi kao izvor energije za kvasce koji ga pretvaraju u alkohol i ugljen-dioksid. U procesu fermentacije šećer igra ključnu ulogu u proizvodnji vina, piva, etanola i drugih fermentisanih proizvoda.

Više šećera u kljuku povećava količinu etanola koji se može proizvesti, ali visoke koncentracije šećera mogu usporiti fermentaciju zbog osmotskog stresa.

Glukoza, fruktoza i saharoza su osnovni šećeri u fermentaciji. Kvasci preferiraju glukozu, dok fruktoza i složeniji šećeri mogu biti manje efikasno fermentisani.

Glikolitički put ili glikoliza jednačina (2) je osnovni metabolički put kojim kvasci razgrađuju glukozu u pirogroždanu kiselinu, koja se zatim pretvara u etanol i ugljen-dioksid.

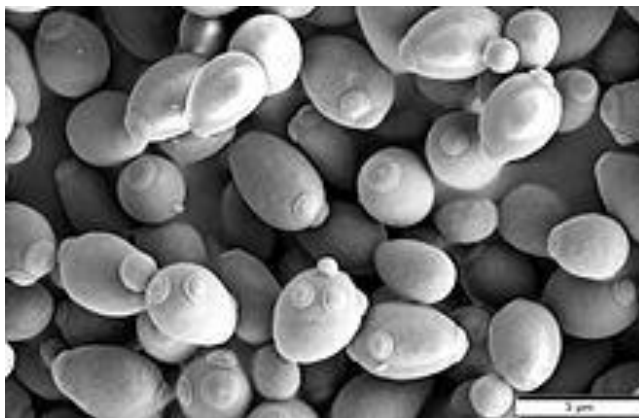


Ova reakcija proizvodi 2 molekula etanola i 2 molekula ugljen-dioksida iz svakog molekula glukoze. Tokom fermentacije, koncentracija šećera se progresivno smanjuje dok kvasci razgrađuju glukozu i fruktozu u alkohol. Brzina fermentacije može opadati kako se koncentracija šećera smanjuje. Ukoliko fermentacija nije završena, mogu ostati nefermentisani šećeri, što se naziva rezidualni šećer. Ovaj šećer može uticati na slatkoću gotovog proizvoda, što je poželjno kod desertnih vina. U proizvodnji vina, nivo šećera u grožđu (ili kljuku) određuje potencijalni nivo alkohola u gotovom vinu. Količina nefermentisanih šećera određuje da li će vino biti suvo, polusuvo ili slatko. Dakle, za postizanje visokog kvaliteta vina ključno je uskladiti: količinu šećera u širi (prirodnu ili dodatnu) i temperaturu fermentacije, i pratiti brzinu fermentacije kako bi se izbjegli neželjeni efekti.

❖ Tip i koncentracija kvasca

Optimalni temperaturni opseg za većinu sojeva kvasaca za vino nalazi se obično između 15 °C i 30 °C. Temperatura izvan ovog opsega može inhibirati rast kvasaca, što može zaustaviti fermentaciju.

Različiti sojevi kvasca imaju različite tolerancije prema temperaturi, etanolu i osmotskom pritisku. Neke vrste preferiraju niže temperature, što je često slučaj kod fermentacije bijelih vina, dok druge preferiraju toplije uslove, što je uobičajeno za proizvodnju crvenih vina. *Saccharomyces cerevisiae* (sl. 15) je prirodni kvasac i najčešći organizam koji se koristi u fermentaciji vina zbog svoje visoke tolerancije na etanol [39]. Iako je često dominantan tokom fermentacije, u početnim fazama drugi prirodno prisutni kvasci mogu započeti proces.



Slika 15. Kvasac *Saccharomyces cerevisiae*

Početna količina kvasca utiče na brzinu fermentacije. Premalo kvasca može dovesti do sporog početka fermentacije, dok previše kvasca može stvoriti višak nusprodukata.

❖ Količina kiseonika

Količina kiseonika je još jedan od važnih faktora koji utiču na proces fermentacije i ukupni kvalitet vina. Kiseonik može imati pozitivne ili negativne efekte na različite faze proizvodnje vina, zavisno od trenutka kada je uveden i u kojoj količini.

Na početku fermentacije, kiseonik igra ključnu ulogu u aerobnom rastu kvasca. Kvasci koriste kiseonik za sintezu lipida i sterola, koji su potrebni za izgradnju i održavanje ćelijskih membrana. Zdrave membrane omogućavaju kvascima da efikasnije prežive stres izazvan prisustvom etanola tokom fermentacije.

Kada fermentacija započne, prisustvo kiseonika postaje nepoželjno. Kvasci prelaze na anaerobni metabolizam, gdje koriste šećere i proizvode alkohol i ugljen-dioksid. Ako kiseonik

ostane prisutan u ovoj fazi, može doći do razvoja neželjenih mikroorganizama (npr. bakterije sirćetne kiseline) koji pretvaraju alkohol u sirćetnu kiselinu, što može uzrokovati kvarenje vina.

Nakon fermentacije, manje količine kiseonika mogu biti korisne tokom mikrooksigenacije. Ovaj kontrolisani proces pomaže stabilizaciji boje crvenih vina i poboljšava polimerizaciju tanina, što rezultira boljom strukturom vina.

Prevelika izloženost kiseoniku može dovesti do oksidacije koja prouzrokuje promjene u boji vina (bijela vina postaju tamnija, dok crvena vina gube boju), kao i do razvoja nepoželjnih aroma, poput orašastih i “sherry” tonova.

❖ Nivo hranljivih materija (azot, vitamini i minerali)

Nivo hranljivih materija, uključujući azot, vitamine i minerale, važan je u procesu fermentacije, kao i za kvalitet krajnjeg proizvoda. Ovi nutrijenti omogućavaju pravilno funkcionisanje kvasca tokom fermentacije, što utiče na brzinu fermentacije, proizvodnju alkohola i organoleptička svojstva vina.

Azot je jedan od najvažnijih hranljivih elemenata za kvasce jer je neophodan za sintezu proteina, nukleinskih kiselina i drugih biomolekula koje su ključne za rast kvasca i fermentaciju. Bez dovoljnog nivoa azota, kvasci ne mogu adekvatno rasti ili pravilno fermentisati šećere u alkohol. Azot je prisutan u obliku slobodnog amonijuma (NH_4^+) i aminokiselina (najčešće u obliku asparagina i glutamina). Oba oblika su lako dostupna za apsorpciju od strane kvasaca. Nedostatak azota može dovesti do sporog rasta kvasca, produžene fermentacije, zaustavljanja fermentacije ili formiranja nepoželjnih jedinjenja kao što su sumporni jedinjenja (npr. H_2S , koji daje miris pokvarenih jaja). Azot se može dodavati u obliku diamonijum fosfata (DAP), što je česta praksa u vinarstvu kako bi se obezbijedio adekvatan nivo azota za kvasce tokom fermentacije.

Vitamini su esencijalni kofaktori koji pomažu enzimima da funkcionišu pravilno u ćelijama kvasca. Oni su neophodni za metabolizam i sintezu ključnih molekula.

Vitamin B1 (tiamin) je ključan za metabolizam ugljenih hidrata i normalan rast kvasca. Nedostatak tiamina može uzrokovati spor fermentacioni proces.

Biotin pomaže u sintezi masnih kiselina i metabolizmu aminokiselina, važan je za održavanje funkcionalnih membrana kvasca.

Pantotenska kiselina (B5) učestvuje u sintezi koenzima A (CoA), što je važno za metabolizam masti i ugljenih hidrata.

Minerali su ključni za funkcionalnost enzima, osmotsku ravnotežu i stabilnost ćelijskih membrana kvasca.

Magnezijum (Mg^{2+}) pomaže u funkcionisanju određenih enzima uključenih u glikolitički put. Nedostatak magnezijuma može uzrokovati sporiju fermentaciju.

Kalijum (K^{+}) je važan za osmotsku regulaciju i pomaže kvascima da održe stabilnost ćelijskih membrana tokom fermentacije.

Cink (Zn^{2+}) je neophodan za pravilnu funkciju mnogih enzima u kvascima, uključujući alkohol dehidrogenazu, koja je ključna za proizvodnju etanola.

Gvožđe (Fe^{2+}/Fe^{3+}) u malim količinama je važno za metabolizam kvasca, ali višak može dovesti do oksidacije vina.

Mineralni sadržaj vina zavisi od zemljišta na kojem se uzgaja vinova loza, ali i od dodataka u procesu fermentacije. U slučaju manjkavosti, minerali se mogu dodati kroz odgovarajuće hranljive dodatke za kvasac.

Nedovoljno hranljivih materija može usporiti rast kvasca, produžiti fermentaciju i uticati na krajnji nivo alkohola. Ako kvasci nemaju dovoljno hranljivih materija, fermentacija može stati prije nego što se sav šećer pretvori u alkohol, što rezultira nekompletnim fermentacijama i nepoželjnim nusproizvodima.

❖ pH vrijednost

Tokom fermentacije, pH vrijednost direktno utiče na aktivnost enzima, hemijsku ravnotežu vina, kao i na mikrobiološku stabilnost.

Optimalna pH vrijednost za crvena vina kreće se od 3.4 do 3.5. Za bijela vina, optimalan raspon pH vrijednosti je između 3.1 i 3.4. pH vrijednost za roze vina obično je slična bijelim vinima, između 3.1 i 3.4. Kvasci najbolje rastu u blago kiselim uslovima, sa pH vrijednostima između 3.5 i 4.5. Niže pH vrijednosti mogu inhibirati rast kvasca i usporiti fermentaciju, dok više pH vrijednosti mogu omogućiti rast neželjenih bakterija.

Kod crvenih vina, niže pH vrijednosti povećavaju stabilnost boje jer utiču na ekstrakciju antocijana iz pokožice grožđa. Na nižim pH vrijednostima, antocijani su stabilniji, što vinu daje

intenzivniju crvenu boju. Vrijednost pH direktno utiče na kiselost vina, što je jedan od ključnih elemenata u organoleptičkom profilu vina. Niže pH vrijednosti daju vinu više osvježavajućeg, kiselkastog ukusa. Viši pH može smanjiti osjećaj kiselosti, što vina može učiniti mekšim i manje osvježavajućim, čak i kada imaju istu količinu šećera. Nizak pH inhibira rast bakterija kao što su *Lactobacillus* i *Acetobacter*, koje mogu proizvesti neželjene kiseline i ukuse. Povišen pH povećava rizik od rasta sirćetnih bakterija koje mogu pretvoriti alkohol u sirćetnu kiselinu, što uzrokuje kvarenje vina.

❖ Prisustvo drugih mikroorganizama

Prisustvo mikroorganizama u proizvodnji vina može imati pozitivne ili negativne efekte, u zavisnosti od vrste mikroorganizama, uslova fermentacije i kontrolnih metoda. Upravljanje mikrobiološkom stabilnošću putem sumporisanja, higijene i kontrole kiseonika ključno je za proizvodnju visokokvalitetnog vina. *Saccharomyces cerevisiae* je glavni kvasac korišćen za kontrolisanu fermentaciju, ali mnogi drugi kvasci, poznati kao divlji kvasci, mogu biti prisutni na grožđu, u opremi i u vazduhu podruma. Neke od najčešćih vrsta divljih kvasaca su:

- *Candida*
- *Pichia*
- *Brettanomyces*
- *Hanseniaspora*.

Kontrolisano prisustvo različitih vrsta kvasaca može pozitivno uticati na fermentaciju i krajnji proizvod. Ukus vina može se modulirati korišćenjem različitih vrsta kvasaca [40].

Bakterije prisutne tokom fermentacije i skladištenja vina mogu značajno uticati na konačni profil vina, uključujući teksturu, kiselost i arome.

Mliječne bakterije (*Lactic Acid Bacteria* – LAB) – vrste bakterija kao što su *Lactobacillus*, *Oenococcus* i *Pediococcus* igraju ključnu ulogu u malolaktičnoj fermentaciji (MLF). Tokom ovog procesa, ovi mikroorganizmi konvertuju oštru jabučnu kiselinu u blažu mliječnu kiselinu, što omekšava vino i poboljšava njegovu teksturu. Ako malolaktična fermentacija nije pravilno kontrolisana, može se pojaviti pretjerano mliječan ukus, kao i sirćetne note uslijed stvaranja sirćetne kiseline. Sirćetne bakterije (*Acetic Acid Bacteria* – AAB) – *Acetobacter* i *Gluconobacter* su najčešće bakterije koje uzrokuju stvaranje sirćetne kiseline iz etanola. Ovo se dešava kada je

vino previše izloženo kiseoniku tokom ili nakon fermentacije. Prisutnost ovih bakterija može dovesti do kvarenja vina jer proizvode sirćetnu kiselinu i etil-acetat, što daje vinu neprijatne sirćetne i rastvorne arome.

❖ Količina alkohola (etanola)

Alkohol ima dvostruku ulogu u proizvodnji vina, dok doprinosi stabilnosti, strukturi i aromi, prekomjerna količina može inhibirati fermentaciju i otežati rast kvasca. Balansiranje nivoa alkohola važno je za postizanje željenog stila vina i optimizaciju fermentacije.

Kako fermentacija napreduje, nivo etanola raste. Na visokim koncentracijama (iznad 15% alkohola), kvasci postaju inhibirani, što može zaustaviti fermentaciju. Različiti sojevi kvasaca imaju različite tolerancije na etanol. *Saccharomyces cerevisiae*, najčešće korišćen kvasac za proizvodnju vina, može podnijeti koncentraciju alkohola do 15 – 16%, dok drugi sojevi mogu imati niže ili više pragove tolerancije. Kako koncentracija etanola raste tokom fermentacije, on postaje toksičan za ćelije kvasca. Alkohol oštećuje ćelijske membrane kvasca i ometa transport hranljivih materija i drugih molekula, što na kraju usporava ili čak zaustavlja fermentaciju.

Količina šećera prisutnog na početku fermentacije određuje potencijalnu koncentraciju alkohola u vinu. Na primjer, visoke koncentracije šećera u kljuku dovode do proizvodnje višeg nivoa alkohola, što može preopteretiti kvasce i povećati rizik od zaustavljanja fermentacije prije kraja. Alkohol doprinosi strukturi vina, dajući mu puniji osjećaj u ustima pri višim nivoima, te pojačava arome i doprinosi balansu između slatkoće i kiselosti, iako previše alkohola može prikriti voćne ili cvjetne note. Viši nivoi alkohola doprinose stabilnosti vina i omogućavaju mu duže starenje bez rizika od mikrobiološkog kvarenja, jer visok sadržaj alkohola inhibira mnoge mikroorganizme, uključujući bakterije koje uzrokuju kvarenje, poput sirćetnih bakterija, djelujući tako kao prirodni konzervansi. Količina alkohola (etanola) nastala tokom fermentacije igra ključnu ulogu u procesu fermentacije i utiče na kvalitet krajnjeg proizvoda.

❖ Osmotski pritisak

Osmotski pritisak je takođe jedan od važnih faktora koji utiče na zdravlje kvasca i efikasnost fermentacije, posebno u proizvodnji vina sa visokim sadržajem šećera. Pravilno upravljanje

osmotskim pritiskom omogućava vinarima da postignu optimalne uslove za fermentaciju, smanjujući rizik od zaustavljanja fermentacije i osiguravajući konzistentan kvalitet vina.

Osmotski pritisak je direktno povezan sa količinom rastvorenih materija u kljuku (najčešće šećera) i može značajno uticati na tok fermentacije.

Na početku fermentacije, posebno kod slatkog grožđa ili desertnih vina, koncentracija šećera u kljuku može biti veoma visoka, što stvara visok osmotski pritisak. Ovo uzrokuje stres za kvasce jer visok osmotski pritisak izvlači vodu iz njihovih ćelija i otežava njihov rast i metabolizam. Kvasci moraju trošiti dodatnu energiju da bi održali osmotsku ravnotežu u ćelijama, što usporava fermentaciju i smanjuje efikasnost proizvodnje alkohola.

Kada se kvasci nađu pod osmotskim stresom, njihova sposobnost da prerađuju šećer i proizvode alkohol se smanjuje. Visoki osmotski pritisak može inhibirati enzime koji su ključni za proces fermentacije, usporavajući konverziju šećera u etanol.

U uslovima visokog osmotskog pritiska, fermentacija može potpuno stati prije nego što se sav šećer pretvori u alkohol. To može dovesti do pojave tzv. rezidualnog šećera, gdje u vinu ostaje nefermentisani šećer. Ovaj šećer može doprinijeti slatkoći vina, ali i povećati rizik od mikrobiološkog kvarenja ako vino nije pravilno stabilizovano.

Kvasci koriste različite strategije za prilagođavanje visokim osmotskim uslovima, kao što je proizvodnja osmoprotektora (molekula poput glicerola) koji pomažu ćelijama da zadrže vodu. Glicerol se proizvodi kao zaštitna supstanca i pomaže u smanjenju stresa za kvasce. Ipak, previše glicerina može uticati na ukus vina, dajući mu blagu slatkoću i punoću.

❖ Vrijeme fermentacije

Faze vrenja grožđa za proizvodnju vina mogu se detaljno objasniti kroz nekoliko ključnih koraka. Svaki korak ima svoju ulogu u transformaciji šećera iz grožđa u alkohol i druga jedinjenja, koja doprinose ukupnom profilu vina.

- Adaptivna ili lag faza

U ovoj ranoj fazi, kvasci se adaptiraju na sredinu kljuka i počinju da konzumiraju dostupne šećere. Aktivnost kvasaca je relativno niska, ali se povećava kako se kvasci množe i prilagođavaju uslovima fermentacije. Kvasci proizvode enzime potrebne za razgradnju šećera u alkohol i ugljen-

dioksid. Ova faza može trajati nekoliko sati do nekoliko dana, u zavisnosti od temperature, koncentracije kvasaca i sastava kljuka.

- Eksponencijalna ili logaritamska faza

Ovo je faza u kojoj kvasci najbrže rastu i proizvode alkohol, ugljen-dioksid, toplotu i druge spojeve, kao što su esteri i aldehidi, koji doprinose aromi vina. Većina šećera u kljuku pretvara se u alkohol tokom ove faze, eksponencijalni rast kvasaca dovodi do povećanja temperature fermentacije, što može uticati na aromu i ukus vina.

- Stacionarna faza

Kako se koncentracija alkohola povećava i količina raspoloživih šećera smanjuje, rast kvasaca usporava. Kvasci postaju manje aktivni, a brzina fermentacije se smanjuje. Neke ćelije kvasaca počinju da umiru i razlažu se, oslobađajući jedinjenja koja mogu doprinijeti složenosti ukusa vina.

- Dekantacija

Kada su svi fermentabilni šećeri potrošeni, fermentacija se završava. Vino se može ostaviti da odstoji na umrlim kvascima (talogu) neko vrijeme kako bi se razvili dodatni ukusi. Vino se pažljivo prenosi (dekantira) iz fermentacionih posuda kako bi se odstranilo od taloga. Ovo takođe može pomoći u klarifikaciji vina.

- Sazrijevanje i završna obrada

Nakon fermentacije, vino se često stavlja da odleži u hrastovim buradima ili čeličnim rezervoarima kako bi se razvili ukus i aroma. Prije flaširanja, vino se može filtrirati da bi se dodatno pročistilo. Zatim se flašira i ostavlja da odleži u boci prije nego što se stavi na tržište.

Kontrola i upravljanje ovim fazama omogućavaju vinarima da proizvedu vina različitih stilova i profila.

3.3 Monitoring i kontrola fermentacije

Kontrola i monitoring procesa fermentacije ključni su za postizanje željenih rezultata u rastu mikroorganizama i proizvodnji vina. Efikasnost fermentacije zavisi od upravljanja brojnim faktorima, uključujući temperaturu, pH vrijednost, nivo kiseonika, osmotski pritisak, koncentraciju alkohola, prisustvo i raspoloživost hranljivih materija, kao i trajanje fermentacije. Održavanje ovih

parametara na optimalnim nivoima omogućava stabilan i kvalitetan proces fermentacije, čime se postiže proizvodnja vina željenih karakteristika [41].

Temperatura je ključna za stabilnost mikroorganizama i optimalan tok fermentacije, utičući na aktivnost kvasaca i formiranje aroma. Preciznim monitoringom i kontrolom temperature, vinari mogu upravljati brzinom fermentacije i kvalitetom aroma. Kontrola temperature se može vršiti na tradicionalni način ili primjenom savremenih tehnologija kao što je vinifikator ili fermentor.

- Kontrola temperature fermentacije u tradicionalnoj proizvodnji vina vrši se tako što se cijeli podrum ili prostorija u kojoj se nalaze sudovi za fermentaciju održava na kontrolisanoj temperaturi. To je jednostavan način kontrole temperature u slučaju manjih fermentora ili buradi koji se koristi u manjim vinarijama. Takođe je energetski efikasan jer održava konstantnu temperaturu za sve posude u istoj prostoriji.

- Otvorena fermentacija sa prirodnim hlađenjem odvija se u otvorenim posudama, često na niskim spoljašnjim temperaturama, posebno kod crvenih vina. Korišćenjem prirodnog strujanja vazduha i ventilacije, temperatura se održava u određenom rasponu.

- Kod većih proizvodnih procesa, kljuk se pumpa kroz izmjenjivače toplote, gdje se hladi do željene temperature, a zatim vraća u fermentor.

- Savremeni fermentacioni rezervoari opremljeni su senzorima temperature koji su povezani sa automatizovanim sistemima za kontrolu hlađenja. Kada temperatura dostigne određeni prag, sistem automatski aktivira hlađenje.

- Suvi led (CO_2 u čvrstom stanju) ili specijalne rashladne ploče se dodaju u fermentor kako bi smanjili temperaturu fermentacije. Suvi led hladi kljuk dok isparava, što dodatno pomaže u kontrolisanju kiseonika.

- Dodavanje inertnih gasova, kao što su azot ili CO_2 , može pomoći u kontroli temperature tako što hladi kljuk dok zamjenjuje kiseonik. Ovaj metod takođe pomaže u sprečavanju oksidacije vina.

Vrijednost pH utiče na aktivnost enzima i rast mikroorganizama. Koriste se specijalni pH metri sa sondama otpornim na vino i kiselinu. Ovi uređaji omogućavaju precizna i kontinuirana mjerenja tokom fermentacije, čime se prati svaki pad ili porast pH vrijednosti. pH se mjeri nekoliko puta dnevno, posebno u ranim fazama fermentacije, kada su promjene najizraženije.

Ako je pH previsok, vinska kiselina se može dodati u kljuk ili vino kako bi se smanjila pH vrijednost. Vinska kiselina je stabilna i pomaže u smanjenju alkalnosti, što povećava kiselost vina

i poboljšava njegovu stabilnost. U manjim količinama, mogu se dodati i druge kiseline kao što su limunska ili mliječna kiselina. Limunska kiselina može brzo sniziti pH vrijednost, dok mliječna kiselina može doprinijeti mekšem ukusu.

Dodavanje sumpor-dioksida (SO_2) pomaže u stabilizaciji pH vrijednosti i sprečava rast nepoželjnih bakterija. SO_2 djeluje kao konzervans i stabilizator, smanjujući rizik od mikrobioloških infekcija koje mogu uzrokovati promjene u pH vrijednosti tokom fermentacije.

Neki napredni fermentacioni sistemi koriste automatizovane pH metrike povezane sa sistemima za automatsko dodavanje kiselina. Na ovaj način se pH može kontinuirano prilagođavati tokom fermentacije, bez potrebe za manuelnom intervencijom.

Softver povezan sa pH senzorima omogućava praćenje pH vrijednosti u realnom vremenu i automatsko upozoravanje vinara na potencijalne promjene koje zahtijevaju intervenciju.

Kiseonik je posebno važan u aerobnim fermentacijama, gdje se kontrola vrši aeracijom i miješanjem. Senzori za kiseonik mjere nivo rastvorenog kiseonika, osiguravajući dovoljan pristup mikroorganizmima za njihovu aktivnost. Oksidacija može uticati na boju i aromu vina. Monitoring i kontrola pristupa kiseonika omogućavaju vinarijama da minimiziraju neželjenu oksidaciju i sačuvaju svježinu vina. Kontrola kiseonika se može vršiti na više načina.

- Senzori za rastvoreni kiseonik (DO senzori) se koriste za mjerenje količine kiseonika rastvorenog u fermentoru. Ovi senzori omogućavaju kontinuirano praćenje koncentracije kiseonika u realnom vremenu, što omogućava pravovremenu reakciju na promjene.
- Optički DO senzori koriste fluorescentnu tehnologiju i smatraju se preciznijima i dugotrajnijima od elektrohemijskih senzora.
- Količina kiseonika u fermentoru kontroliše se putem sistema za aeraciju, gdje se kiseonik dodaje u kontrolisanim količinama. Protok vazduha ili čistog kiseonika može se prilagođavati kako bi se održao optimalan nivo kiseonika u različitim fazama fermentacije.
- Raspršivači i difuzori u fermentoru pomažu u ravnomjernom raspoređivanju kiseonika kroz tečnost, čime se osigurava njegova dostupnost mikroorganizmima.
- Miješanje je ključno za distribuciju kiseonika, posebno u velikim fermentorima. Agitatori pomažu u tome da kiseonik bude ravnomjerno raspoređen kroz tečnost, čime se omogućava adekvatan kontakt kiseonika sa ćelijama mikroorganizama. Brzina miješanja može se prilagoditi kako bi se održao optimalan nivo kiseonika. Previše intenzivno miješanje može povećati potrošnju

energije i smanjiti stabilnost vina, pa se brzina često optimizuje prema specifičnim potrebama fermentacije.

Savremeni fermentori često koriste automatizovane sisteme sa povratnim petljama za kontrolu kiseonika. Kada DO senzor otkrije pad koncentracije kiseonika ispod zadate vrijednosti, sistem automatski povećava protok kiseonika ili vazduha. Praćenjem koncentracije šećera i alkohola tokom fermentacije, vinar može tačno odrediti kada je proces završen ili kada su potrebne korektivne mjere.

Praćenjem mikrobiološkog statusa kljuka i vina, vinari mogu brzo reagovati na znakove kontaminacije i spriječiti razvoj štetnih mikroorganizama koji mogu pokvariti vino.

Monitoring i kontrola u proizvodnji vina su od suštinske važnosti za postizanje konsistentnog kvaliteta i željenih karakteristika gotovog proizvoda. Ovi procesi omogućavaju vinarijama da precizno upravljaju svakim korakom proizvodnje, od fermentacije do odležavanja i flaširanja.

Zbog svega navedenog, moderna vinifikacija sve više koristi napredne tehnike monitoringa i kontrola, uključujući IoT uređaje za praćenje u realnom vremenu, automatizovane sisteme za kontrolu temperature i softver za upravljanje podacima. Ove tehnologije omogućavaju vinarijama da postignu preciznost i kvalitet u svakom koraku proizvodnje, osiguravajući da svaka boca vina zadovolji očekivanja potrošača.

Razvoj tehnologije, posebno uvođenje Internet stvari (IoT) rješenja, značajno je transformisao industriju proizvodnje vina, nudeći napredne metode za monitoring i kontrolu procesa vrenja. Poređenje tradicionalnih metoda sa IoT rešenjima otkriva kako digitalizacija može poboljšati efikasnost, preciznost i kvalitet u vinifikaciji.

❖ Tradicionalne metode

Tradicionalne metode monitoringa i kontrole u vinifikaciji oslanjaju se na ručno uzimanje uzoraka, vizuelnu inspekciju i empirijsko znanje vinara. Temperatura fermentacije kontroliše se prirodnim hlađenjem ili zagrijavanjem prostora, a u bolje opremljenim vinarijama koriste se vinifikatori sa termostatom koji u sudovima za fermentaciju (sl. 16) aktiviraju sistem za hlađenje ili grijanje u zavisnosti od vrijednosti temperature. Ovi fermentacioni sudovi često su napravljeni od nerđajućeg čelika i imaju ugrađene sisteme za cirkulaciju rashladne tečnosti (obično vode ili glikola), dok se zagrijavanje vrši pomoću termalnih omotača kojima su sudovi obloženi. pH

vrijednost, sadržaj šećera i alkohola mjere se laboratorijskim instrumentima na licu mjesta ili uzimanjem uzoraka za analizu u laboratoriji. Iako ove metode omogućavaju proizvodnju visokokvalitetnih vina, one često zahtijevaju mnogo vremena, radnu snagu i podložne su greškama zbog manualnog rukovanja i varijacija u procjeni.



Slika 16. Vinifikatori u vinopodrumu Oglednog imanja “Lješkopolje”

❖ IoT rješenja

IoT rješenja u vinifikaciji koriste povezane senzore i uređaje koji omogućavaju automatski monitoring i kontrolu ključnih parametara procesa u realnom vremenu. Ovi sistemi pružaju dinamičke podatke koji se mogu koristiti za precizno upravljanje fermentacijom, temperaturom, vlažnošću i drugim važnim faktorima. Senzori neprekidno prate ključne parametre, omogućavajući brzu reakciju na anomalije, dok se prikupljeni podaci analiziraju za identifikaciju trendova,

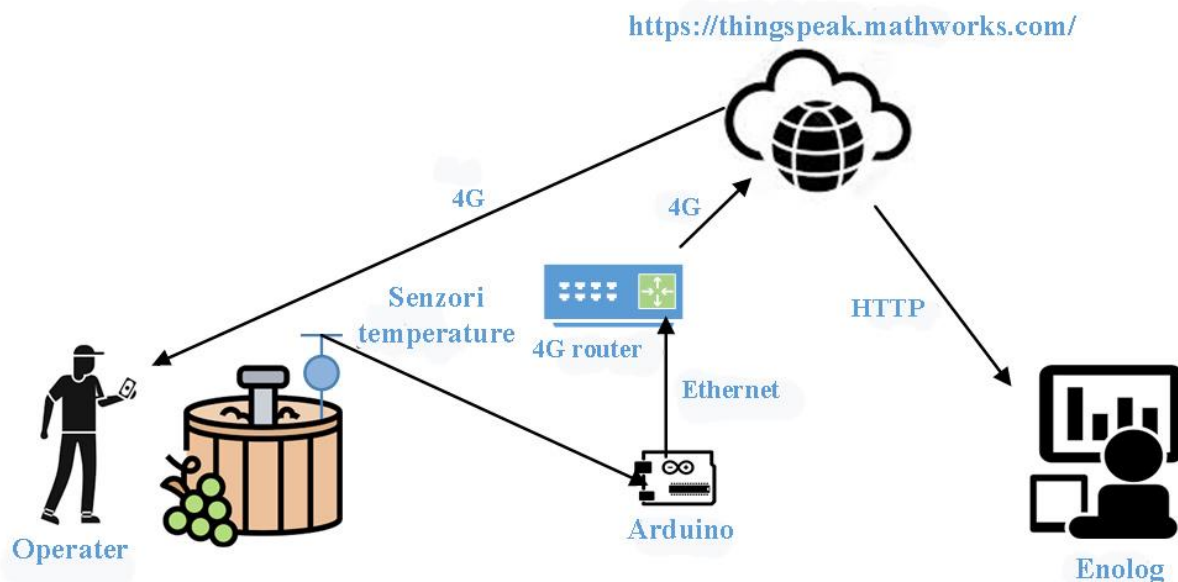
predviđanje potencijalnih problema i donošenje odluka na osnovu dobijenih informacija. IoT rješenja takođe omogućavaju vinarijama da pristupe podacima i kontrolišu procese sa bilo koje lokacije, što je korisno za velike vinarije sa više upravljačkih lokacija.

Iako tradicionalne metode i dalje imaju svoje mjesto, posebno u proizvodnji vina malih serija ili u regijama sa duboko ukorijenjenim vinarskim tradicijama, IoT rješenja nude brojne prednosti u pogledu efikasnosti, preciznosti i mogućnosti za inovacije u proizvodnji vina. Integracijom IoT tehnologija, vinarije mogu poboljšati svoju sposobnost da proizvode visokokvalitetna vina konzistentno, optimizujući procese i smanjujući troškove. Upravo je jedna primjena IoT sistema u tradicionalnoj proizvodnji vina predmet ove teze.

4. Arhitektura predloženog sistema

Razvoj i primjena IoT tehnologija predstavljaju značajan potencijal za unapređivanje tradicionalnih metoda u poljoprivredi, uključujući i proizvodnju vina. U kontekstu ovog istraživanja, osnovna ideja bila je da se dizajnira i implementira niskobudžetni IoT sistem za kontrolu temperature groždanog kljuka tokom alkoholne fermentacije, sa funkcionalnošću slanja upozorenja putem e-maila u slučaju prekoračenja definisanih temperaturnih pragova. Cilj je poboljšati efikasnost tradicionalnog procesa proizvodnje vina i obezbjediti bolji kvalitet finalnog proizvoda.

Predloženi sistem oslanja se na savremene IoT pristupe, uključujući upotrebu mikrokontrolerskih uređaja (kao što su Arduino ili Raspberry Pi), senzora za precizno praćenje temperature i Cloud platforme za prikupljanje, vizuelizaciju i analizu podataka. Arhitektura sistema je osmišljena tako da omogućava integraciju sa tradicionalnim načinom proizvodnje vina u vinopodrumu Oglednog imanja ‘Lješkopolje’ Biotehničkog fakulteta. Očekuje se da ovakav pristup obezbijedi precizno praćenje temperaturnih uslova, minimizira rizik od nekontrolisane fermentacije i doprinese postizanju stabilnijeg procesa i proizvodnje vina boljeg kvaliteta. Prikupljeni podaci tokom eksperimentalnog rada mogu se koristiti za kreiranje baze istorijskih podataka, čime će se omogućiti dublja analiza faktora koji utiču na proces fermentacije i kvalitet vina. Sistem je dizajniran tako da se postepeno prilagođava i optimizuje kroz iterativno testiranje, kako u laboratorijskim tako i u realnim uslovima proizvodnje. Konačni cilj je potvrda hipoteze da IoT tehnologije mogu doprinijeti boljoj kontroli procesa fermentacije i unapređivanju proizvodnje vina kroz primjenu modernih tehnoloških rješenja u kombinaciji sa tradicionalnim metodama. Na slici 17. predstavljena je funkcionalna šema predloženog sistema.



Slika 17. Funkcionalna šema IoT sistema za kontrolu temperature fermentacije groždanog kljuka

Ova šema opisuje jednostavan IoT sistem za daljinsko praćenje temperature pomoću Cloud servisa, omogućavajući nadzor u realnom vremenu na daljinu. Senzori mjere temperaturu i povezani su sa Arduino Uno pločom. Podaci o temperaturi prikupljeni sa senzora šalju se na Arduino za obradu. Arduino Uno prikuplja podatke sa senzora temperature i obrađuje ih. Povezan je sa ruterom putem Ethernet kabla kako bi omogućio prenos podataka na mrežu. Ruter se povezuje na Internet putem 4G mobilne mreže i omogućava da Arduino prenosi podatke na Cloud platformu.

Podaci o temperaturi sa Arduino uređaja šalju se na ThingSpeak platformu, gdje se čuvaju i analiziraju u realnom vremenu, a mogu se pregledati na laptopu ili mobilnom uređaju. Na ovaj način, korisnik (enolog) može u realnom vremenu pratiti promjene temperature, a operater koji radi u vinopodrumu može dobiti obavještenje o kritičnim vrijednostima temperature kako bi intervenisao na kljuku.

4.1 Funkcionalni zahtjevi sistema

Ovo poglavlje definiše funkcionalne zahtjeve sistema koji je razvijen za kontrolu temperature groždanog kljuka tokom procesa alkoholne fermentacije. Funkcionalni zahtjevi su osmišljeni tako da zadovolje potrebe za preciznošću, pouzdanošću i jednostavnošću korišćenja u kontekstu

tradicionalne proizvodnje vina. Shodno analizi procesa alkoholne fermentacije i sugestija tehnologa i enologa sa Biotehničkog fakulteta definisani su funkcionalni zahtjevi prezentovanog rješenja koji će biti nabrojani u ovom poglavlju.

- Mjerenje trenutne vrijednosti temperature groždanog kljuka u tri tačke. Naime, da bi se sveobuhvatno pratile temperature kljuka, tehnolozi su preporučili da se mjeri temperatura na tri pozicije u okviru suda za fermentaciju – na dnu, u sredini i na vrhu suda. Ovo omogućava detekciju temperaturnih razlika duž visine fermentacionog suda, što je ključno za uniformnost procesa.

- Potrebna tačnost mjerenja temperature kljuka treba da je 0.5 °C, pa su korišćeni senzori koji imaju najmanje ovu tačnost.

- Mjerenje temperature treba da se obavlja u unaprijed definisanim i podesivim vremenskim intervalima .

- Podaci o trenutnoj vrijednosti temperature treba da se šalju u realnom vremenu na predefinisano Cloud platformu.

- Cloud platforma treba da ima mogućnost čuvanja, vizuelizacije i obrade podataka, kako u realnom vremenu tako i naknadno.

- Korisnici treba da imaju mogućnost pristupa putem web browser-a, kako trenutnim tako i istorijskim podacima.

- Cloud platforma treba da omogući generisanje upozorenja (alarma) u slučaju prekoračenja predefinisanih granica mjerene temperature i da se ove granice mogu mijenjati. Ova funkcionalnost smanjuje rizik od nekontrolisane fermentacije i doprinosi određenu kontrolu procesa fermentacije iniciranjem pravovremene reakcije korisnika. U konkretnom slučaju, enolozi su definisali da je donja granica temperature fermentacije 15 °C, a gornja 29 °C.

- Sistem treba da podržava eksportovanje podataka u raznim formatima za softverske alate koji vrše razne analize podataka (npr. MATLAB).

4.2 Nefunkcionalni zahtjevi

Prilikom dizajniranja i implementacije IoT sistema za monitoring temperature fermentacije groždanog kljuka, ključno je uzeti u obzir ne samo tehničke, već i operative i ekološke faktore koji utiču na njegovu pouzdanost, efikasnost i sigurnost. Specifičnosti vinograda i vinopodruma,

kao i tradicionalne metode proizvodnje vina koje se koriste na Oglednom imanju “Lješkopolje”, dodatno naglašavaju važnost pažljivog pristupa ispunjavanju nefunkcionalnih zahtjeva sistema. Ogledno imanje “Lješkopolje” raspolaže vinogradom od oko 22 hektara i vinskim podrumom kapaciteta 500 hl, koji predstavlja najstariji poluindustrijski vinopodrum u Crnoj Gori. Proces proizvodnje vina na ovom imanju uključuje kako tradicionalne metode tako i fermentaciju u vinifikatorima sa kontrolisanim uslovima. U tom kontekstu, treba ispuniti nekoliko nefunkcionalnih zahtjeva koji su ključni za realizaciju ovog IoT rješenja.

- Komponente sistema treba da ispune uslove dosta visoke radne temperature (oko 40 °C), vlage karakteristične za proces fermentacije i prisustva prašine i CO₂ u samom podrumu.
- Senzori koji se koriste moraju biti vodootporni, jer se mjerenja temperature vrše direktno u tečnosti (groždani sok), da imaju dovoljno dug provodnik jer je sud za fermentaciju visine od 1.5 m i da su otporni na korozivne efekte fermentacije.
- Budući da se tokom procesa fermentacije oslobađa CO₂ kroz dosta dinamičan proces i da se vrši manuelno miješanje kljuka radi smanjenja temperature, senzore treba pričvrstiti tako da se ne pomjeraju i ne oštete tokom miješanja i oslobađanja pomenutog gasa.
- Sistem treba obezbijediti od prekida napajanja i Internet konekcije kako bi radio neprekidno tokom cijelog procesa fermentacije koji traje 6 – 7 dana, nekada i duže.
- Arduino mikrokontroler i ruter treba zaštititi od uticaja prašine, vlage, samog kljuka i fizičkog kontakta, odnosno u ambijentu gdje je instaliran.
- Sistem treba da bude jednostavan za korišćenje krajnjim korisnicima, posebno radnicima koji vrše nadgledanje procesa fermentacije i intervenciju na procesu (miješanje i hlađenje kljuka).

4.3 Izbor platforme i okruženja

U nastavku rada biće opisane platforme za implementaciju ovog sistema, radno okruženje samog IoT sistema, kao i njegova implementacija na odabranom imanju.

❖ Arduino Uno

Arduino ploča je platforma sa mikrokontrolerom (sl. 18), odabrana zbog jednostavnosti u povezivanju sa senzorima i mogućnosti Ethernet konekcije, razvijena u kompaniji Arduino.

Arduino UNO je popularna u projektima automatizacije, robotike i IoT-a zbog svoje jednostavnosti, fleksibilnosti i podrške za različite senzore i module. Glavna komponenta Arduino UNO ploče je ATmega328P mikrokontroler koji omogućava kontrolu različitih senzora i modula. Ima 14 digitalnih pinova za ulaz/izlaz (od kojih se 6 može koristiti kao PWM izlazi), 6 analognih ulaza, keramički rezonator od 16 MHz (CSTCE16M0V53-R0), USB konekciju, priključak za napajanje, ICSP header (*In Circuit Serial Programming*) i dugme za resetovanje. Sadrži sve što je potrebno za podršku mikrokontroleru, jednostavno se povezuje sa računarom pomoću USB kabla, može se napajati i adapterom za AC i za DC ili baterijom. Programiranje Arduino ploče obavlja se u Arduino IDE (*Arduino Integrated Development Environment*) okruženju pisanom u Java jeziku, koje je kompatibilno sa operativnim sistemima Windows, Linux i Mac OS X. Arduino IDE omogućava lako programiranje u C i C++ jezicima i podržava serijsku komunikaciju sa uređajima poput laptopa ili računara. Arduino softver (IDE) uključuje serijski monitor koji omogućava slanje i prijem jednostavnih tekstualnih podataka sa i na ploču. RX i TX LED diode na ploči će treptati kada se podaci prenose putem USB-to-serial čipa i USB veze sa računarom (ali ne i za serijsku komunikaciju na pinovima 0 i 1) [42] [43].



Slika 18. Arduino Uno

❖ ThingSpeak Cloud platforma

ThingSpeak je moćna platforma za IoT analitiku koja obezbjeđuje sveobuhvatan alat za prikupljanje, vizuelizaciju, analizu i upravljanje IoT podacima. Njena fleksibilnost u radu sa različitim uređajima i protokolima, kao i integracija sa MATLAB-om, čini je pogodnim rješenjem

za različite IoT projekte, od kućnih aplikacija do industrijskih sistema. ThingSpeak je stabilno rješenje za prototipiziranje, analizu podataka i pokretanje IoT sistema manjeg obima.

ThingSpeak se koristi za različite IoT aplikacije, uključujući analizu podataka u realnom vremenu koja omogućava detekciju obrazaca koji ukazuju na potencijalne kvarove, čime se olakšava planiranje preventivnog održavanja. Praćenjem parametara kao što su temperatura, vlažnost, potrošnja energije i drugih faktora može se poboljšati efikasnost i sigurnost rada industrijskih sistema. Prikupljeni podaci omogućavaju nadgledanje udaljenih uređaja, dok analiza može automatski pokrenuti upozorenja ili akcije kada su potrebne. Takođe, ThingSpeak može služiti za senzorsku mrežu koja prikuplja podatke o kvalitetu vazduha, osvjetljenju, temperaturi i drugim parametrima u realnom vremenu. Upotreba ThingSpeak-a podrazumijeva jednostavne korake za povezivanje uređaja, prenos podataka i njihovu analizu:

Registracija naloga je prvi korak u korišćenju ThingSpeak-a (sl. 19), zatim i kreiranje kanala za svaki set podataka koji se želi pratiti (sl. 20). Svaki kanal može sadržati do osam polja, koja predstavljaju različite parametre, poput temperature, vlažnosti i sl.

The screenshot shows the 'My Profile' page on the ThingSpeak platform. The page is divided into several sections:

- My Profile:** Contains fields for Email (mmarijana@ucg.ac.me), Time Zone (GMT+01:00 Belgrade), and Username (mwa000034470243). There is an 'Update Profile' button.
- API Keys:** Displays the User API Key as 75330CK6V458LP03.
- Help:** Includes 'Account Settings' instructions and 'API Requests' examples.

Account Settings:

- MathWorks Account email and password are needed to sign in to ThingSpeak.
- If you edit your MathWorks Account settings, you will need to sign out of ThingSpeak and log back in.
- Your username is displayed as the author of your public channels.
- Your username must be 6-27 characters, containing only letters and numbers.
- Time Zone is used when displaying data in your charts, and when scheduling your ThingSpeak apps.
- User API key is required to create and manage channels using the REST API.

API Requests:

- Get Channel List:** GET `https://api.thingspeak.com/channels.json?api_key=75330CK6V458LP03`
- Create a Channel:** POST `https://api.thingspeak.com/channels.json` with a JSON body.

Slika 19. Kreiranje naloga na ThingSpeak platformi

ThingSpeak™ Channels Apps Devices Support

Field 1: Temperatura dno ☒

Field 2: Temperatura sredin ☒

Field 3: Temperatura vrh ☒

Field 4: ☐

Field 5: ☐

Field 6: ☐

Field 7: ☐

Field 8: ☐

Metadata:

• Ch
• De
• Fie
ch
• Me
• Ta
• Lir
Th
• Sh
• Vic

This website uses cookies to improve your user experience, personalize content and analytics.

Slika 20. Polja sa parametrima na kanalu kreiranom na ThingSpeak platformi

Podaci se sa IoT uređaja šalju na ThingSpeak putem REST API-ja ili MQTT protokola. Podržana je i integracija sa drugim platformama kao što su The Things Network, Senet, Libelium Meshlium i Particle.io, omogućavajući prenos podataka preko različitih mreža, uključujući LoRaWAN i 4G/3G veze. ThingSpeak omogućava vizuelizaciju prikupljenih podataka u realnom vremenu putem grafika i widget-a, a analitika se može unaprijediti pomoću MATLAB-a. Može izvršavati analitičke funkcije kao što su filtriranje podataka, prediktivna analiza, čišćenje podataka, i mašinsko učenje, koristeći MATLAB kod direktno u okviru ThingSpeak-a (sl. 21).

ThingSpeak™ Channels Apps Devices Support Commercial Use How to Buy MM

Watch

Makitest

Channel ID: 2640387
Author: mwa000034470243
Access: Public

Private View Public View Channel Settings Sharing API Keys Data Import / Export

Add Visualizations Add Widgets Export recent data MATLAB Analysis MATLAB Visualization

Channel Stats

Created: 2 months ago
Last entry: about a month ago
Entries: 18914

Slika 21. Vizuelizacija i analiza podataka na ThingSpeak platformi

Podaci sa senzora se šalju na Thingspeak u intervalima, gdje se mogu pregledati u vidu grafika i tabelarnih prikaza (grafik 2 i tabela 2.).



Grafik 2. Grafički prikaz podataka prikupljenih na ThingSpeak platformi

Tabela 2. Tabelarni prikaz primjera podataka prikupljenih na ThingSpeak platformi

created_at	entry_id	field1	field2	field3
2024-09-02T16:05:10+02:00	11974	29.94	28.94	30.50?
2024-09-02T16:05:52+02:00	11975	30	28.94	30.50?
2024-09-02T16:07:38+02:00	11976	30	28.94	30.50?
2024-09-02T16:09:23+02:00	11977	30.06	28.94	30.50?
2024-09-02T16:12:12+02:00	11978	30	28.94	30.50?
2024-09-02T16:12:54+02:00	11979	30.06	28.94	30.50?
2024-09-02T16:17:06+02:00	11980	30.06	28.94	30.50?
2024-09-02T16:18:30+02:00	11981	30.13	28.94	30.50?
2024-09-02T16:19:54+02:00	11982	30.06	28.94	30.50?
2024-09-02T16:20:57+02:00	11983	30.06	28.94	30.50?
2024-09-02T16:21:40+02:00	11984	30.06	28.94	30.50?
2024-09-02T16:23:25+02:00	11985	30.06	28.88	30.50?
2024-09-02T16:25:31+02:00	11986	30.13	28.88	30.50?
2024-09-02T16:25:52+02:00	11987	30.13	28.88	30.50?
2024-09-02T16:27:59+02:00	11988	30.13	28.88	30.44?
2024-09-02T16:28:41+02:00	11989	30.13	28.88	30.50?
2024-09-02T16:30:05+02:00	11990	30.13	28.88	30.50?
2024-09-02T16:30:26+02:00	11991	30.13	28.88	30.44?

Platforma omogućava kreiranje događaja zasnovanih na e-mailu ili SMS upozorenju. Kada podaci pređu unaprijed određene pragove, ThingSpeak automatski šalje obavještenje u zavisnosti od uređaja i senzora koji se koriste.

Ova platforma je izabrana zato što se osnovne funkcionalnosti ThingSpeak-a mogu koristiti besplatno, dok je za napredne funkcije MATLAB analitike potrebna MATLAB licenca. Takođe kompatibilna je sa većinom IoT uređaja koji podržavaju ove protokole.

❖ Veza sa Internetom

Veza sa internetom ostvarena je putem Arduino Ethernet modula (sl. 22), koji je povezan na ruter Huawei-B311s-220 i koji posjeduje Ethernet priključak za povezivanje putem Ethernet kabla. Ovaj ruter omogućava pristup internetu korišćenjem 4G mobilne mreže kako bi se povezao na Internet, omogućavajući prenos podataka sa Arduino uređaja na Cloud platformu (ThingSpeak). Lokalna mreža (LAN) se uspostavlja između Arduino uređaja (Ethernet Shield) i pomenutog rutera putem Ethernet kabla.



Slika 22. Arduino Ethernet modul

Korišćenje Ethernet veze između Arduino uređaja i rutera obezbeđuje stabilnu i pouzdanu komunikaciju. Za potrebe implementacije našeg sistema ovaj ruter funkcioniše kao *gateway* između lokalne mreže i Interneta. Može biti postavljen na bilo kojem mjestu gdje postoji pokrivenost mobilnom mrežom (3G/4G), što je idealno za vinograde ili druge udaljene lokacije gdje nema dostupne kablovske veze ka Internetu.

Ruter koristi 802.11b/g/n, 2.4GHz protokol, podržava Wi-Fi standarde b/g/n na 2.4GHz frekvenciji. MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) tehnologija omogućava stabilniji i brži Wi-Fi sa maksimalnom brzinom do 300 Mbps. Upotreba ovog rutera pogodna je na lokacijama koje imaju dobar signal mobilne mreže pružaoca usluga. Za slanje malih količina podataka (npr. temperaturnih očitavanja), čak je dovoljna i 3G mreža.

❖ Senzor temperature

Za realizaciju ovih funkcionalnih zahtjeva izabran je voodootporni temperaturni senzor DS18B20 (sl. 23) koji koristi jednožični interfejs. Ovaj senzor omogućava povezivanje više komada na jednu liniju podataka, pojednostavljujući ožičenje i smanjujući troškove sistema. Ima temperaturni opseg od -55 °C do 125 °C i pruža tačnost od ± 0.5 °C u temperaturnom opsegu od -10 °C do 85 °C. Jedna od prednosti DS18B20 je njegova mala dimenzija, što ga čini lakim za integraciju u sisteme sa ograničenim prostorom. Takođe ima nisku potrošnju energije, što ga čini idealnim za sisteme sa ograničenim izvorima napajanja. Dodatno, DS18B20 ima digitalni izlaz, koji olakšava povezivanje sa mikrokontrolerima i drugim digitalnim kolima.

DS18B20 se može koristiti u raznim aplikacijama, uključujući sisteme za praćenje i kontrolu temperature, evidenciju temperature i HVAC sisteme. Senzor DS18B20 ima tri pina:

- VCC (napajanje),
- GND (uzemljenje) i
- DATA (signalni pin).

Tehnički detalji DS18B20 senzora su:

- ✓ Voodootporan: IP65/IP68
- ✓ Radni napon: 3.0 ~ 5.5V
- ✓ Raspon temperature: -55 °C ~ +125 °C
- ✓ Tačnost testa: plus 0.5 °C (unutar raspona od -10 °C ~ +85 °C in)
- ✓ Veličina kućišta od nerđajućeg čelika: 6 x 50 mm 6 x 30 mm
- ✓ Dužina kabla: 1, 2, 3 i 5 m
- ✓ Izlazni vodovi: crveni (VCC), žuti (DATA), crni (GND) [43].



Slika 23. Temperaturni senzori DS18B20

❖ Univerzalni USB punjač 5V/1A

Ovi punjači imaju standardni USB-A konektor za izlaz, tako da se može napajati Arduino, Raspberry Pi itd. putem USB kabla. Bilo koji uređaj koji koristi USB kabl za punjenje ili napajanje može se napajati ovim adapterom. Sadrži i zaštitu od kratkog spoja i preopterećenja (sl. 24).



Slika 24. Univerzalni USB punjač 5V/1A

4.4 Realizacija prototipa sistema i implementacija u vinskom podrumu

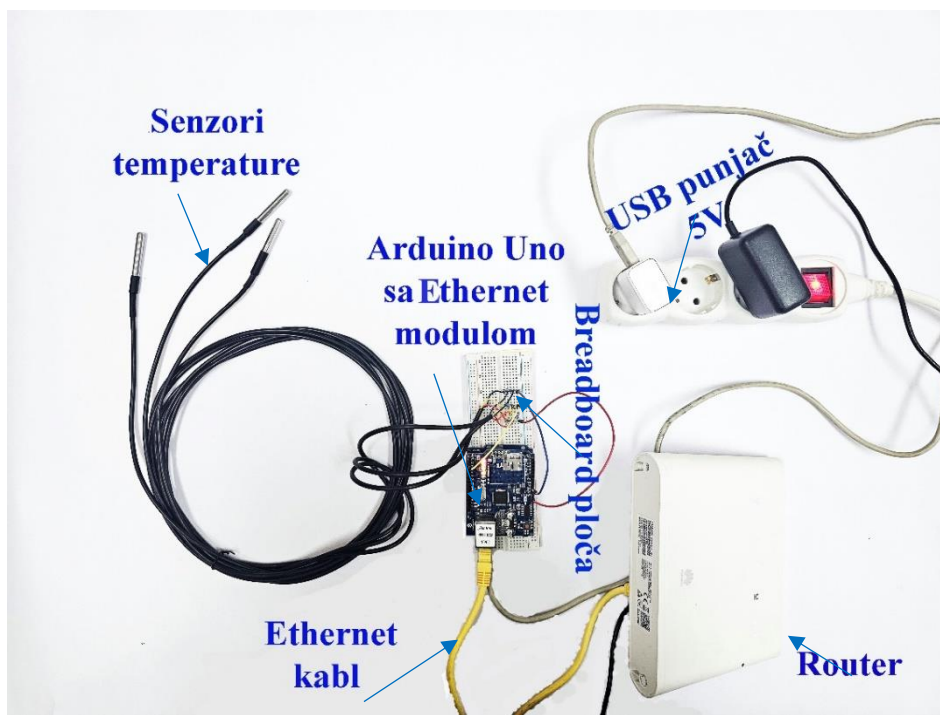
Predloženi sistem mjerenja temperature groždanog kljuka može da bude instaliran u podrumu proizvođača koji vrši proizvodnju vina na tradicionalni način, a u našem slučaju izabrano je

Ogledno imanje “Lješkopolje” Biotehničkog fakulteta koje ima prepoznatljivo vino dobijeno baš ovakvim načinom proizvodnje. Izabrana arhitektura sistema temelji se na kombinaciji savremenih i pristupačnih tehnologija koje pružaju pouzdan i efikasan način praćenja temperature tokom procesa fermentacije groždanog kljuka.

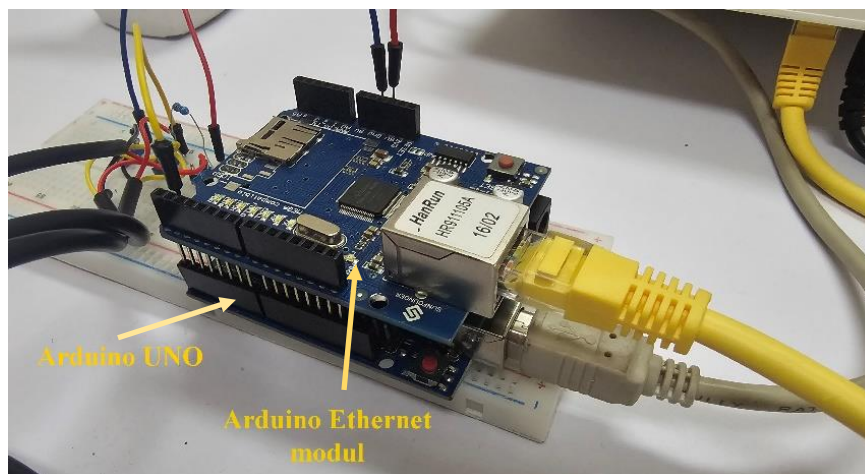
Kao što je već objašnjeno i prikazano na slici 17, centralni dio sistema čini Arduino UNO koji će se napajati energijom putem standardnog USB punjača od 5 V. Veza sa Internetom ostvarena je korišćenjem Arduino Ethernet modula koji se direktno povezuje na ruter putem Ethernet kabla.

Temperaturu groždanog kljuka mjere tri vodootporna temperaturna senzora DS18B20, a podaci sa senzora očitavaju se na Arduino i šalju na obradu i vizualizuju na ThingSpeak platformi u realnom vremenu.

Na slici 25. predstavljen je prototip predložene arhitekture, a slika 26. prikazuje način povezivanja Arduina UNO sa Arduino Ethernet modulom.

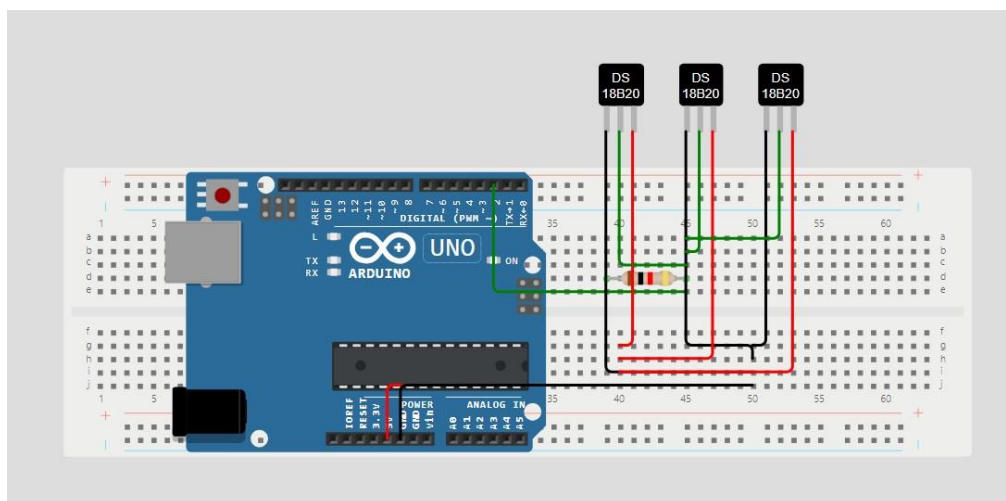


Slika 25. Prototip predloženog IoT sistema



Slika 26. Arduino UNO povezan sa Arduino Ethernet modulom

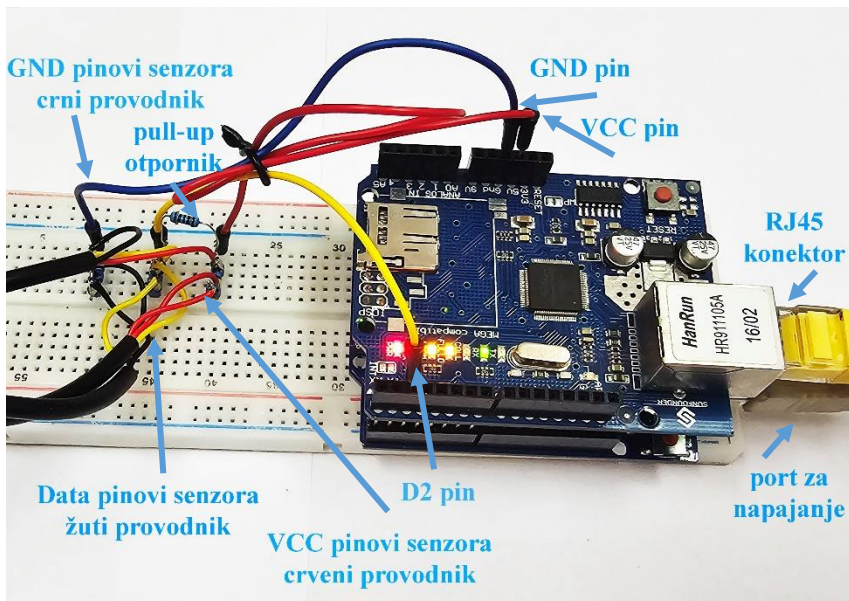
Šema povezivanja tri temperaturna senzora sa Arduino UNO mikrokontrolerskom pločom prikazana je na slici 27.



Slika 27. Šema povezivanja senzora sa Arduino UNO pločom

VCC pinovi (crvene linije) svakog senzora povezani su na 5 V pin na Arduino ploči, što omogućava napajanje sensorima. GND pinovi (crne linije) svakog senzora povezani su na GND pin na Arduino ploči, što omogućava uzemljenje svih senzora. Svi DATA pinovi (zelene linije) senzora povezani su zajedno i spojeni na digitalni pin 2 na Arduino ploči. Ovaj pin će prikupljati podatke sa svakog senzora. Na DATA liniji nalazi se pull-up otpornik od 4.7 kΩ, koji je povezan između DATA linije i napajanja (VCC). Otpornik je neophodan za stabilizaciju signala sa senzora.

Ova konfiguracija omogućava da Arduino prikuplja podatke sa više DS18B20 senzora preko jednog digitalnog pina (u našem slučaju D2 pin) koristeći “One-Wire” protokol (sl. 28).



Slika 28. Povezivanje DS18B20 senzora sa Arduinoom i Ethernet modulom

Predloženi prototip je bilo potrebno implementirati u realnim uslovima vinskog podruma na imanju Biotehničkog fakulteta.

U zavisnosti od agroekoloških uslova i pravovremeno sprovedenih agrotehničkih mjera svake godine se na Oglednom imanju “Lješkopolje” odvija berba grožđa. Grožđe se obično bere krajem avgusta, ili početkom septembra što je bio slučaj i 2024 godine, mada zrelost grožđa ne nastupi svake godine u isto vrijeme, što zavisi od gore pomenutih faktora. Grožđe namjenjeno proizvodnji vina bere se u fazi tzv. tehnološke zrelosti. Pod tim se podrazumijeva onaj vid zrelosti grožđa koji za dati tip vina ima najbolji odnos šećera i ukupnih kiselina. Na pomenutom imanju okosnicu vinograda čine autohtone sorte za crvena vina, vranac i u nešto manjem obimu kratošija, koje se gaje na oko 18 ha. Zavisno od klimatskih uslova, godišnje se preradi od 100 do 180 tona grožđa. Zahvaljujući specifičnostima lokaliteta, sortimentu, kvalitetu grožđa, zatim tradicionalnoj tehnologiji koja se primjenjuje i znanjima stečenim kroz naučna istraživanja, Biotehnički fakultet već dugi niz godina proizvodi prepoznatljiva vina Vranac i Vranac barrique. Za potrebe našeg istraživanja nakon ručne berbe zdravih i zrelih grozdova, grožđe je dopremljeno u vinopodrum i muljačom (sl. 29) je odvojeno od peteljki i listova. Muljanje je pripremna faza za fermentaciju grožđa koje se gnječi da bi se oslobodio groždani sok. Po završetku muljanja dobija se šira

izmiješana sa čvrstim djelovima grožđa (kljuk). Tako dobijenim groždanim kljukom posebnom pumpom pune se fermentacioni sudovi (sl. 30).



Slika 29. Muljača na imanju “Lješkopolje”



Slika 30. Punjenje fermentacionog suda

Nakon što je sud napunjen kljukom, izmjerena je vrijednost šećera u kljuku pomoću širomjera. Mjerenje se vrši Ekslovim širomjerom (sl. 31) koji pokazuje specifičnu težinu šire, odnosno koliko je 1 litar šire teži od 1 litra destilovane vode. Širomjer je baždaren na temperaturi od 20 °C i ako dođe do odstupanja da bi se dobile precizne vrijednosti potrebno je izvršiti korekciju. Korekcija se vrši uz pomoć tablice koja dolazi uz širomjer (tabela 3).

Tabela 3. Korekcije vrijednosti za mjerenje po Eksl-ovom širomjeru

Temperatura (°C)	Korekcija (°Oe)
21 °C	+0.2 °Oe
22 °C	+0.4 °Oe
23 °C	+0.6 °Oe
...	...
20 °C	0 (bez korekcije)
19 °C	-0.2 °Oe
18 °C	-0.4 °Oe
17 °C	-0.6 °Oe

Početna temperature groždanog kljuka zavisi od temperature okoline i uslova u podrumu, a ove godine kretala se oko 27 °C. Nakon izvršenih korekcija zabilježen je sadržaj šećera u kljuku u fermentacionom sudu koji je iznosio 22.64%.



Slika 31. Širomjer

Pored suda za fermentaciju trebalo je improvizovati postolje na koje bi se smjestio predloženi sistem (Arduino i razvojna pločica) na koju su bili spojeni temperaturni senzori. Nadalje, bila je potrebna konstrukcija za potapanje senzora u kljuk koja će omogućiti fiksiranje senzora na dnu, po sredini i pri vrhu samog suda za fermentaciju. Izabrana je inoks šipka visine 3 m i na nju su fiksirana tri voodootporna senzora za mjerenje temperature na različitim visinama (sl. 32).



Slika 32. Inoks šipka sa fiksnim senzorima u fermentacionom sudu sa grožđanim kljukom

Kako bi predloženi sistem bio zaštićen od vlage (iz fermentacionog suda se ponekad izbacuju dijelovi kljuka usljed burne fermentacije ili dok operator miješa kljuk), smješten je u zatvorenu PVC kutiju, zajedno sa ruterom na platformu pored suda za fermentaciju (sl. 33).



Slika 33. Fotografija predloženog IoT sistema za kontrolu temperature alkoholne fermentacije u vinskom podrumu

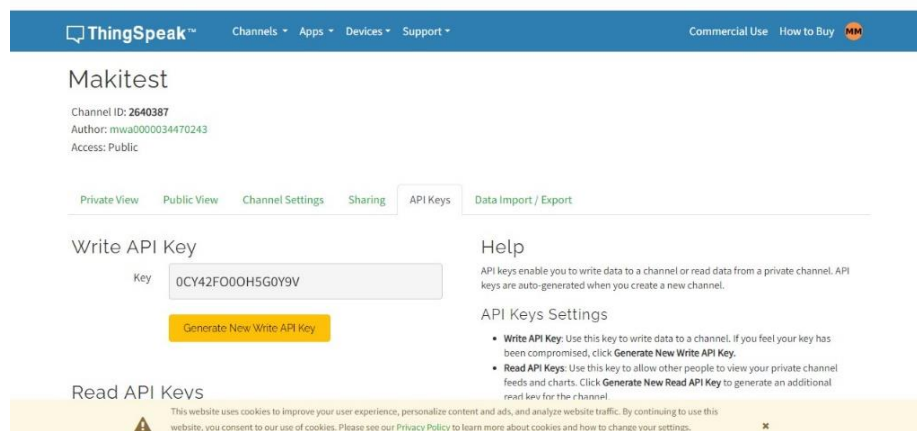
5. Rezultati eksperimentalne primjene

Predloženo rješenje je prvo testirano u laboratorijskim uslovima, tako što su senzori bili potopljeni u vodu različite temperature (sl. 34) i provjeravane su tražene funkcionalnosti.



Slika 34. Testiranje senzora

Tokom laboratorijskog rada uspostavljene su i testirane tražene funkcionalnosti i vršeno je programiranje Arduino kontrolera kod (1) u dodatku rada, kao i podešavanje Cloud platforme. Pristup podacima reguliše se kroz API ključeve i podešavanje autentifikacije na ThingSpeak platformi, čime se sprečava neovlašćeni pristup podacima (sl. 35).



Slika 35. ID kanala i API ključ na platformi ThingSpeak

Za potrebe implementacije našeg sistema podešavanje granica za alarme o prekoračenju temperature kljuka generiše se u realnom vremenu pomoću koda napisanog u MATLAB programskom jeziku, integrisanog sa ThingSpeak platformom kod (2) u dodatku rada.

Da bi se ispunio minimum nefunkcionalnih zahtjeva, sistem je smješten u PVC kutiju (sl. 36), mada bi se adekvatnija mogla izraditi pomoću 3D štampača.



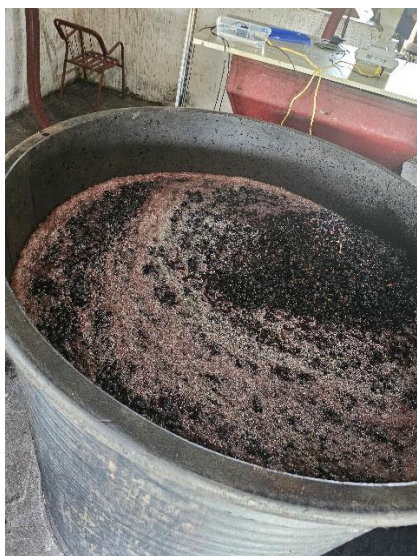
Slika 36. PVC kutija u koju je smješten mikrokontroler i razvojna pločica

Testiranje u laboratorijskim uslovima pokazalo je da sistem ispunjava sve funkcionalne zahtjeve i nakon toga se pristupilo implementaciji u realnim uslovima prema gore izloženom planu.

5.1 Postavka eksperimenta

Kontrola fermentacije groždanog kljuka u proizvodnji crvenog vina na tradicionalan način primjenom predstavljenog IoT sistema obavljena je u periodu od 2. do 8. septembra 2024. godine u vinopodrumu Oglednog imanja “Lješkopolje”. Kao što je navedeno, u ovom periodu je vršena proizvodnja vina, odnosno fermentacija groždanog kljuka. Na tradicionalni način odvijala se fermentacija u više fermentacionih sudova zapremine od 1500 l u koje se smješta oko 1350 kg

grožđa vranac. Za potrebe ovog eksperimenta izdvojen je jedan takav sud sa grožđanim kljukom (sl. 37) u koji su smješteni senzori i postavljen sistem za kontrolu (sl. 38), kao što je objašnjeno u poglavlju 4.4.



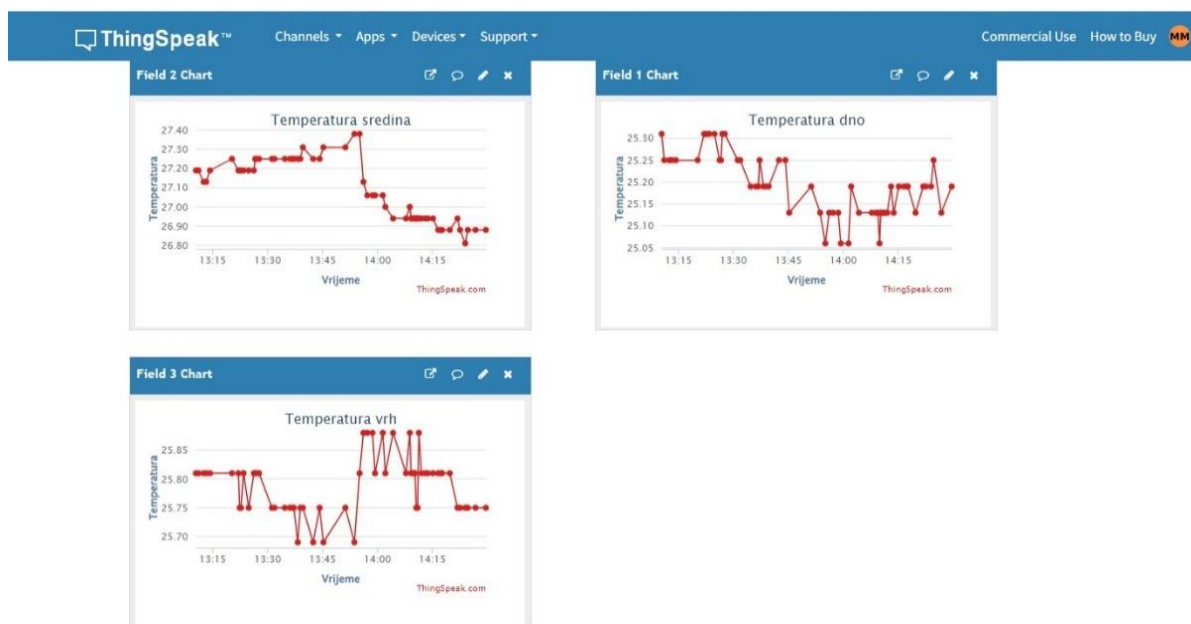
Slika 37. Fermentacioni sud sa grožđanim kljukom



Slika 38. Instalacija sistema

Eksperiment je protekao uz konstantno mjerenje temperature kljuka u rasponu od 10 s, iako je dovoljno jedan minut. Razlog za ovo bili su povremeni prekidi uzrokovani pomjeranjem senzora zbog ispuštanja ugljen-dioksida i miješanja kljuka. Ovo učestalije slanje podataka omogućilo je detektovanje mogućeg prekida, reagovanje, a naknadno i ocjenu srednje temperature u minuti na osnovu dostupnih trenutnih vrijednosti.

Radnici (operatori) u vinopodrumu i enolozi Biotehničkog fakulteta su imali mogućnost stalnog monitoringa temperature na sajtu <https://thingspeak.mathworks.com/> gdje su podaci grafički prikazivani. Izgled dostupnih grafika na kojima se mogu očitati trenutne vrijednosti temperature sa sva tri senzora koji su postavljeni na različitim visinama fermentacionog suda prikazan je na grafiku 3.



Grafik 3. Vizuelizacija mjerenih vrijednosti sa senzora na ThingSpeak platformi

Sa preuzetih grafika može se primijetiti da je preciznost senzora na drugoj decimali, što je i više nego preporučena tačnost senzora za mjerenje temperature kljuka.

Poruke (alarmi) o izmjerenim vrijednostima temperature van definisanih okvira stizale su na e-mail adrese dežurnog operatera i dizajnera sistema (sl. 39).

Alert: Informacije o temperaturi kljuka

Upozorenje: Temperatura je iznad 29°C u jednom od polja!
Dno bureta: 28.81°C
Sredina bureta: 30.38°C
Vrh bureta: 29.44°C

Time: 2024-09-04 17:49:109 :+0200

You are receiving this email because a ThingSpeak Alert was requested using your ThingSpeak Alerts API key. For more information please refer to the [ThingSpeak Alerts Documentation](#).



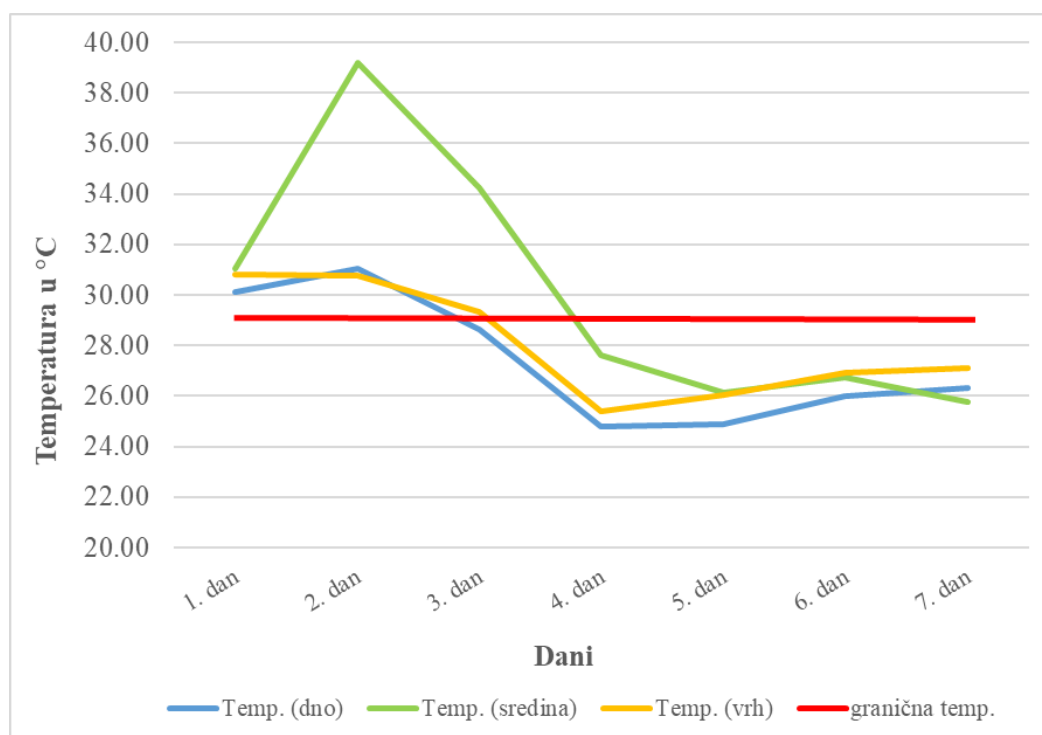
Slika 39. E-mail obavještenja o prekoračenju temperature fermentacije groždanog kljuka

Operater je bio zadužen da, kada primi e-mail o prekoračenju temperature kljuka reaguje tako što miješanjem kljuka ili puštanjem vode kroz crijevo omotano oko fermentacionog suda rashlađuje kljuk i time smanjuje temperaturu kljuka i vraća ga u željene granice. Nažalost, radnik koji je reagovao na uputstva operatera (koja su van radnog vremena bila putem mobilnog telefona) nije uvijek bio neposredno pored fermentacionog suda pa su se dešavala prekoračenja temperature fermentacije u dužem periodu, a posebno u drugom i trećem danu fermentacije. Tokom ovog najintenzivnijeg perioda fermentacije, usljed pomjeranja inoks šipke, dolazilo je do povlačenja senzora, što je rezultiralo ispadanjem pinova sa Arduino ploče. Zahvaljujući redovnim obavještenjima koja su pristizala putem e-maila, situacija je pravovremeno sanirana vraćanjem pinova u ležište. Kako bi se riješio problem nestabilnosti sistema izazvanog labavim vezama provodnika sa Arduino pločom i malom robustnošću cijelog sistema, PVC kutija sa mikrokontrolerom i šipka sa senzorima su dodatno učvršćeni na postolju, tj. obodu fermentacionog suda. Istovremeno, intenzivirano je i miješanje kljuka kako se ne bi ugrozio cjelokupni eksperiment. U svakom slučaju, operater je više i adekvatnije intervenisao na eksperimentalnom fermentacionom sudu nego na ostalima koje je povremeno obilazio i subjektivno procjenjivao da li treba ili ne treba miješati ili hladiti kljuk.

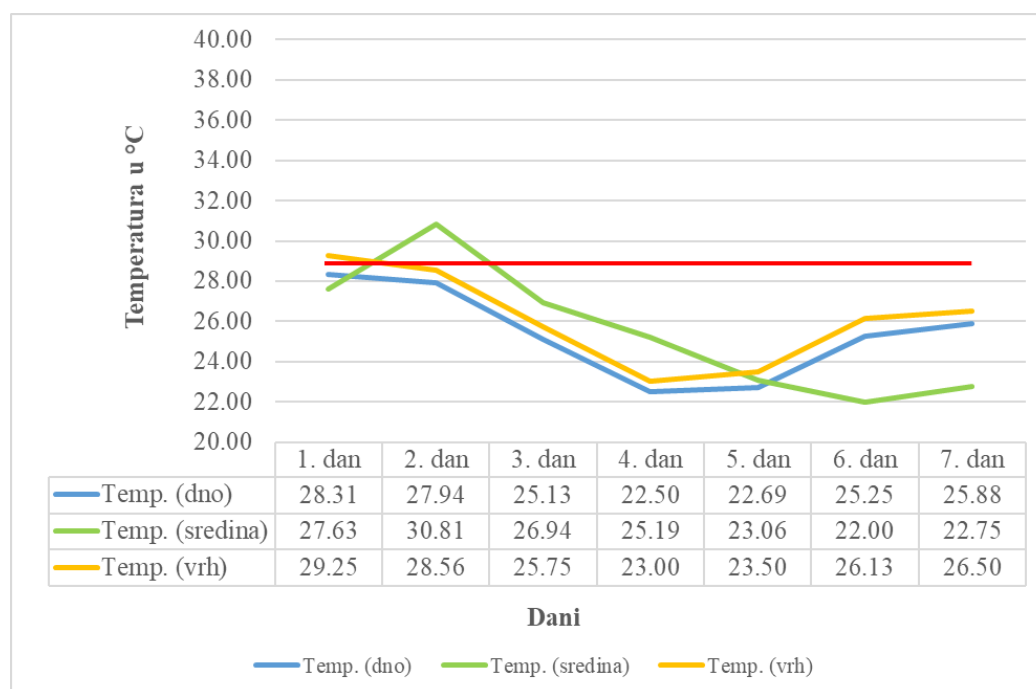
Arduino kao centralna komponenta ovog sistema sadržavala je unaprijed definisan algoritam po kome se prikupljanje vrijednosti sa senzora šalju na Cloud platformu. Za predstavljanje rezultata korišćene su prosječne vrijednosti temperature na svaki sat mjerenja, iz razloga što se vrijednosti temperature nisu značajno mijenjale u ovim intervalima, niti bi takve promjene mogle uticati na tok fermentacije.

5.2 Rezultati eksperimenta

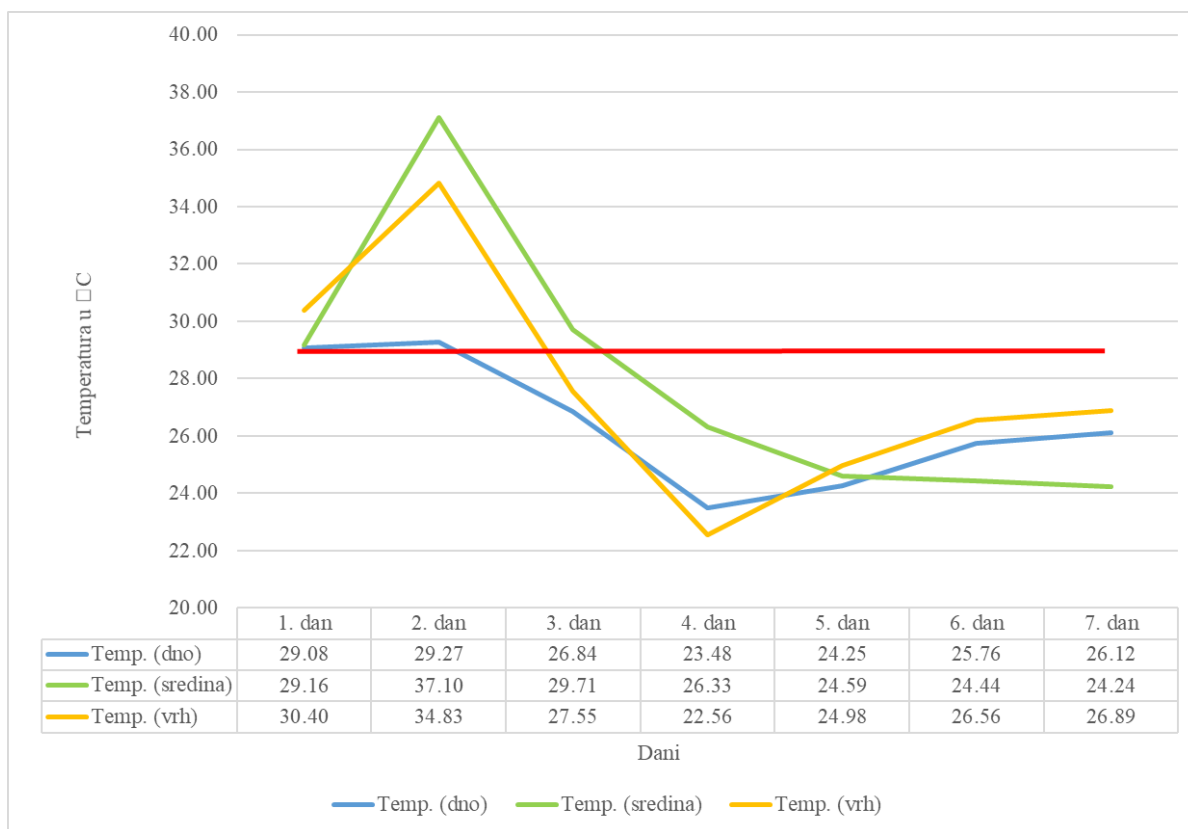
Na graficima 4, 5. i 6. prikazane su maksimalne, minimalne, kao i srednje vrijednosti temperature groždanog kljuka u vrijeme fermentacije računate na interval od sat vremena. Za prikaz vrijednosti temperature korišćen je dataset mjerenja prikupljenih sa platforme ThingSpeak, koji je obuhvatao 18.946 zapisa po senzoru tokom čitavog trajanja procesa fermentacije.



Grafik 4. Maksimalne temperature fermentacije po danima

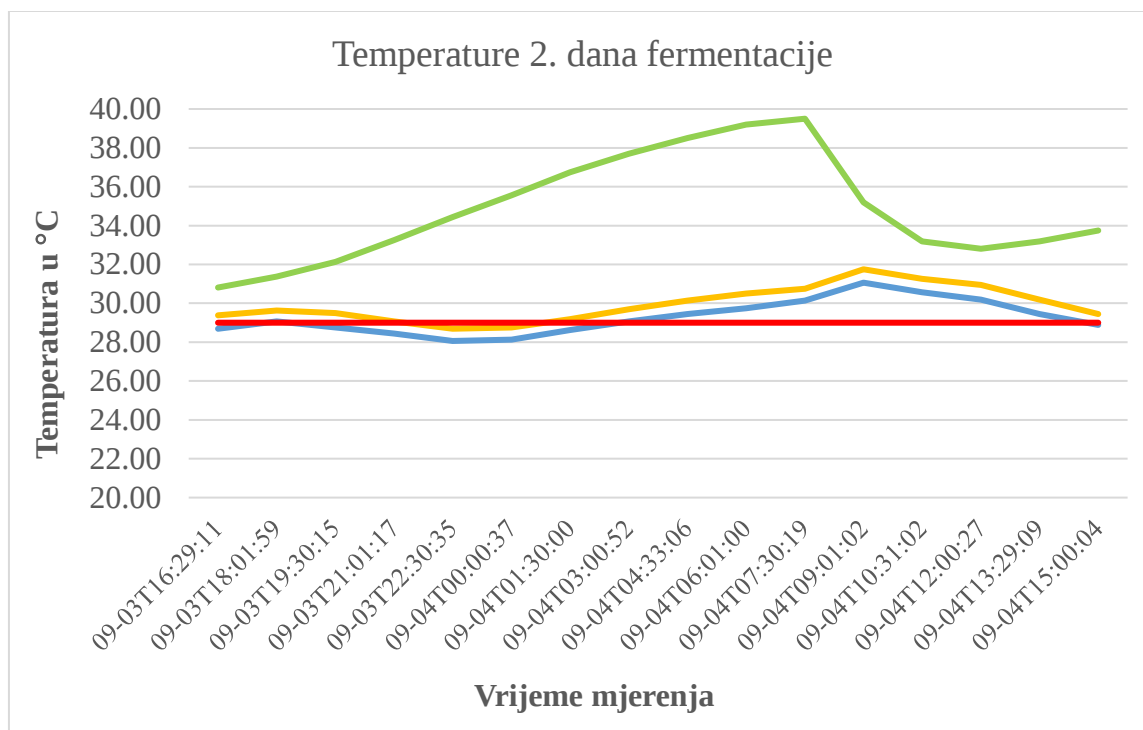


Grafik 5. Minimalne temperature fermentacije po danima



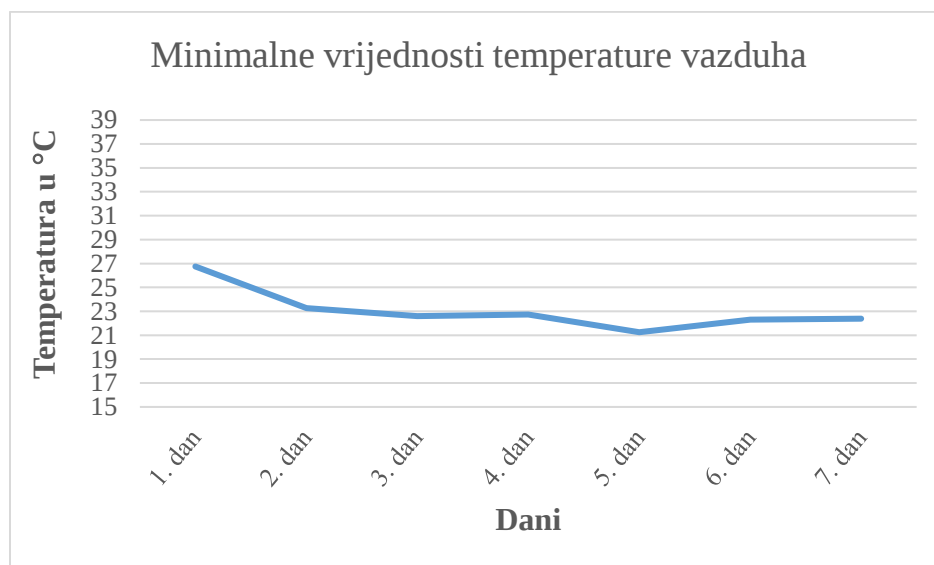
Grafik 6. Srednja vrijednost temperature fermentacije po danima

Na graficima se može vidjeti da je crvenom linijom obilježena i zadata granična temperatura od 29 °C. Na grafiku 7. prikazana su mjerenja trenutne temperature kljuka u jednom danu, konkretno drugog dana fermentacije, kada su izmjerene najvisočije temperature fermentacije.

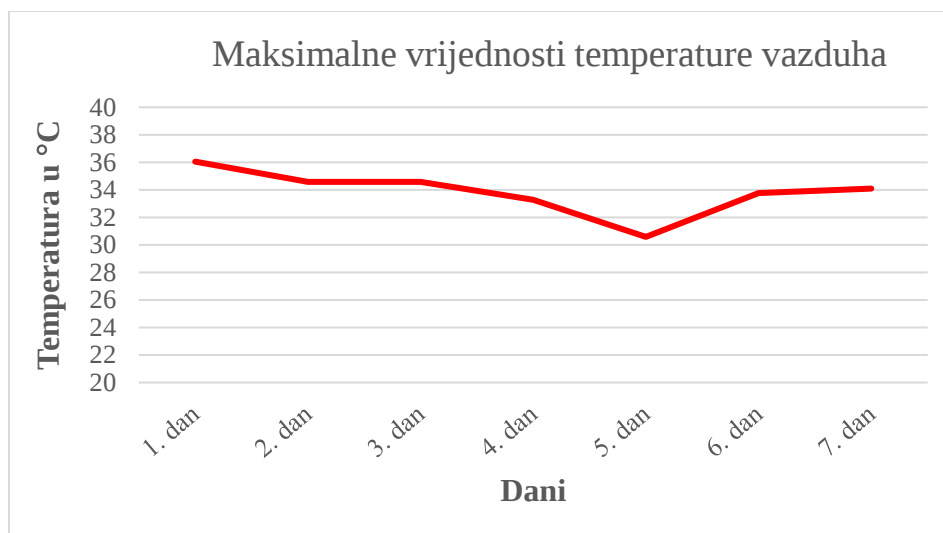


Grafik 7. Prikaz mjerenja temperature u toku jednog dana

Treba napomenuti da su u ovom periodu bile dosta visoke ambijentalne temperature (grafici 8 i 9), što je svakako uticalo na temperaturu u fermentacionom sudu. Ovi podaci su preuzeti sa sajta Hidrometerološkog zavoda Crne Gore.



Grafik 8. Minimalne vrijednosti temperature vazduha u vrijeme fermentacije



Grafik 9. Maksimalne vrijednosti temperature vazduha u vrijeme fermentacije

Analizom gore navedenih grafika u poređenju sa graničnom temperaturom od 29 °C, mogu se izvesti dolje naveden zaključci o procesu fermentacije.

Prvi i drugi dan: temperature na vrhu, sredini i dnu su blizu ili iznad granične temperature vrijednosti, posebno u sredini fermentacionog suda i to drugog dana. Ovo ukazuje na intenzivnu aktivnost fermentacije. Početna faza već prvog dana pokazuje značajne razlike temperature na različitim visinama duž fermentacionog suda, što može ukazivati na aktivan početak procesa.

Treći i četvrti dan: temperature padaju ispod granične vrijednosti, što signalizira usporavanje procesa fermentacije.

Peti do sedmi dan: temperature ostaju stabilne sa najmanjim oscilacijama, ispod 29 °C u većem dijelu fermentacionog suda, što sugerise na završnu fazu fermentacije.

Iz analiza uticaja varijacije temperature na proces fermentacije uočava se da se jasno razlikuju 3 faze u procesu fermentacije i njihove karakteristike.

- Početna faza (1. i 2. dan) – visoke temperature i oscilacije ukazuju na aktivnu fermentaciju, koja je povezana s intenzivnim rastom mikroorganizama. Prekoračenje granične temperature u sredini fermentacionog suda može izazvati stres na mikroorganizme, ali istovremeno podstiče brzu transformaciju šećera.

- Srednja faza (3. i 4. dan) – pad temperature ispod 29 °C označava usporavanje aktivnosti, usljed iscrpljivanja hranljivih materija ili nagomilavanja produkata fermentacije.

- Kasna ili završna faza (5. do 7. dan) – stabilizacija temperature cijelom dužinom fermentacionog suda ukazuje na završnu fazu fermentacije.

Na kraju se može izvući zaključak da je za praćenje fermentacije ključni drugi dan, kada su najveće oscilacije i potencijalni rizik od prekoračenja optimalne temperature, te stabilnost temperature fermentacije u kasnijim danima sugerise da je proces uspješno završen.

Nakon završetka fermentacije, koji se registruje mjerenjem specifične težine pomoću areometra (šiomjera), pokazaće se da je sav šećer pretvoren u alkohol, što ujedno predstavlja i kraj fermentacije.

Kad se vino iz sudova za fermentaciju otočilo i odstojalo nekoliko dana, uzeti su uzorci vina i izvršena hemijska analiza. U tabeli 4. prikazani su rezultati hemijskih analiza kontrolnog vina, gdje nije vršena kontrola temperature u toku fermentacije i vina proizvedenog u sudu za fermentaciju gdje su senzorima praćene temperaturne vrijednosti uz pomoć predloženog IoT sistema.

Tabela 4. Hemijski sastav ispitivanih vina

Parametar	Kontrolno vino	Vino sa kontrolom
Specifična težina	0.9926	0.9941
Alkohol (% vol)	15	14.65
Ukupan ekstrakt (g/l)	31.7	32.8
Redukujući šećer (g/l)	3	3.3
Ukupne kiseline (g/l)	5.3	5.45
Isparljive kiseline (g/l)	0.68	0.55
pH vrijednost	3.57	3.45
Slobodan SO ₂ (mg/l)	24.5	25
Ukupan SO ₂ (mg/l)	55.09	60.5

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da su ispitivana vina imala visok sadržaj alkohola, što je posljedica visokog sadržaja šećera u grožđu (prosječno 25%). Analogno visokom sadržaju šećera u širi, ukupan sadržaj ekstrakta u ispitivanim vinima je takođe visok. U oba vina pokazalo se da je vrijednost redukujućih šećera manji od 4 g/l, što ukazuje na činjenicu da ispitivana vina pripadaju kategoriji suvih vina.

Vrijednosti ukupnih kiselina doprinose mikrobiološkoj stabilizaciji i svježini vina i tipične su za sortu vranac. Vrijednosti pH korespondiraju sa sadržajem ukupnih kiselina izmjerenih u ispitivanim vinima. Evidentiran je veći sadržaj ukupnih kiselina i niža pH vrijednost u vinu sa kontrolom temperature, što ukazuje da je postignut efekat dobijanja vina sa potencijalno većom biološkom stabilnošću.

Prosječan sadržaj isparljivih kiselina od 0.65 g/l nema negativan uticaj na kvalitet vina, s tim što je niži sadržaj ovog parametra određen u vinu sa kontrolom temperature, što je posljedica pravilnijeg toka alkoholne fermentacije. Oba vina su zaštićena od dalje oksidacije i potencijalne mikrobne kontaminacije slobodnim SO₂, prisutnim u dovoljnoj količini u vinima (24.5 i 25.0 mg/l). Rezultati prikazani u tabeli 4. ukazuju na ujednačeni hemijski sastav vina dobijenih primjenom predloženog IoT sistema za monitoring temperature fermentacije, i kontrolnog vina gdje temperatura nije kontrolisana primjenom IoT tehnologija, sa određenom varijabilnošću pojedinih parametara, što je uslovljeno kontrolom temperature u toku alkoholne fermentacije. Oba vina imaju odlične karakteristike, tipične za sortu vranac i Podgorički subregion, koja se odlikuju visokim sadržajem alkohola i ekstrakta i umjerenim ukupnim kiselinama, što je u skladu sa istraživanjima [44] [45].

Senzornom ocjenom ispitivanih vina utvrđeno je da su oba vina intenzivne rubin crvene boje, izraženog sortnog mirisa na sitno bobičasto voće, punog tijela, umjerene taninske strukture, što karakteriše vina Biotehničkog fakulteta proizvedena od sorte vranac . Senzorna ocjena vina podrazumijeva degustaciju vina pomoću čula (vida, mirisa i ukusa), čiji je osnovni cilj definisanje, opisivanje i ocjena osobina i kvaliteta vina. Ocjenu vrše degustatori koji moraju biti stručno osposobljena lica za vršenje senzornog ocjenjivanja kvaliteta vina.

Poređenjem senzornih karakteristika vina utvrđen je bolji aromatski profil kod vina gdje je praćena i kontrolisana temperatura u toku alkoholne fermentacije. Niže temperature su dovele do sporijeg procesa fermentacije i proizvodnje bolje izbalansiranog vina sa laganim taninima i delikatnijim profilom ukusa. Kontrolisani uslovi su omogućili proizvodnju vina sa finijim aromama i poboljšanim voćnim notama vina.

Implementacija senzora u fermentacionim sudovima, iako korisna, pokazala je određene izazove. Ključno je pravilno pozicionirati senzore i redovno održavati njihovu funkcionalnost. Tokom burne fermentacije, zbog velike količine oslobođenog CO₂, inoks šipka na koju su bili

pričvršćeni senzori pomjerala se nekoliko puta. Ovaj problem mogao je dovesti do netačnih očitavanja temperature, što bi ugrozilo cijeli proces praćenja.

Za buduće implementacije ovakvih sistema, važno je osigurati stabilno pričvršćivanje senzora na nosače i njihovu pouzdanu konekciju sa mikrokontrolerima poput Arduino ploče. Izbor inoks šipke kao nosača pokazao se kao dobar zbog otpornosti na hemijske uticaje i mogućnost sprečavanja kontaminacije vina mikroorganizmima ili bakterijama. Ipak, nosač mora biti sigurno pričvršćen za fermentacioni sud kako bi se spriječile nepravilnosti tokom fermentacije.

Ovaj rad predstavio je jedan od načina kontrole temperature fermentacije u tradicionalnom procesu proizvodnje vina, koristeći niskobudžetni sistem koji omogućava djelimičnu kontrolu proizvodnog procesa. Iako se ovakvo rješenje donekle pokazalo efikasnim, za potpunu kontrolu fermentacije potrebno je razviti dodatne IoT sisteme koji bi pratili i upravljali i ostalim značajnim parametrima, poput nivoa kiseonika, šećera, ili kiselosti.

Postupke, kao što su automatsko hlađenje fermentacionih sudova ili miješanje groždanog kljuka, trebalo bi automatizovati ili poluautomatizovati kako bi se dodatno olakšao proces proizvodnje.

Primjena IoT sistema u tradicionalnom procesu proizvodnje vina zahtijeva određene investicije, ali nudi značajne benefite u vidu unapređivanja kvaliteta, konzistentnosti i efikasnosti. Uz viziju i spremnost na modernizaciju, ovakvi sistemi mogu osigurati očuvanje kvaliteta vina proizvedenog na tradicionalni način. Djelimična automatizacija i unapređivanje kontrole predstavljaju ključne korake ka održivosti i unapređivanju ovog kompleksnog procesa.

6. Zaključak

U ovom radu je predložen jedan IoT sistem za kontrolu temperature alkoholne fermentacije groždanog kljuka, koji omogućuje precizno online praćenje temperature u realnom vremenu sa bilo koje lokacije i alarmiranje radnika u slučaju neprihvatljivih temperaturnih vrijednosti radi efikasnosti tradicionalne proizvodnje vina i boljeg kvaliteta istog.

Koncept predloženog rješenja je poznat od ranije u literaturi, ali je u radu predložen metod implementacije u specifičnim uslovima izabranog vinskog podruma. Sistem je dizajniran kao niskobudžetno rješenje, što ga čini dostupnim malim i srednjim vinarijama koje žele da modernizuju svoje proizvodne procese bez značajnih ulaganja.

Prezentovana komparativna hemijska analiza i senzorna ocjena vina proizvedenog uz korišćenje predloženog rješenja i vina proizvedenog od istog grožđa u istim uslovima pokazuje nešto bolje karakteristike vina uz primjenu predloženog rješenja. Time je potvrđeno da kontrola temperature tokom alkoholne fermentacije omogućava proizvođačima vina da postignu željeni stil vina, povoljnu hemijsku strukturu, naglašene specifične senzorne osobine i na taj način osiguraju željeni kvalitet i postojanost vina.

Rezultati bi bili još bolji da su operateri adekvatnije reagovali na primljene poruke i više pratili vrijednosti temperature na dostupnoj platformi. Upravo zbog dominantnog uticaja ljudskog faktora potpuna automatizacija kontrole temperature se nameće kao sljedeći korak u unapređivanju ovog sistema.

Treba istaći važnost primjene ovog sistema naročito u početnim fazama tzv. burne fermentacije, i posebno u područjima čije klimatske karakteristike uključuju visoke temperature tokom cijelog proizvodnog procesa od branja grožđa, do storniranja finalnog proizvoda, što može uticati na kvalitet i prinos vina.

Primjenom dizajniranog sistema u vinopodrumu Biotehničkog fakulteta omogućeno je prikupljanje i analiza istorijskih podataka o temperaturi alkoholne fermentacije za razne berbe, odnosno istraživanje korelacije sa hemijskom i senzornom analizom vina i time detaljno determinisanje uticaja temperature na razne faktore u procesu fermentacije i kvalitet vina.

Iako postoje napredne tehnologije poput vinifikatora, tradicionalni proces proizvodnje vina, sa svojim bogatim nasljeđem, ostaje nezamjenjiv. Predlog za primjenu IoT sistema u ovom procesu

usmjeren je ka očuvanju ove tradicije, dok se istovremeno uvode inovacije koje povećavaju efikasnost i kvalitet.

Primjena ovog rješenja objedinjuje znanja i vještine iz više disciplina, što ovom procesu daje multidisciplinarni karakter.

Buduća unapređivanja ovog sistema bi mogla biti u pravcu monitoringa u realnom vremenu nivoa šećera, pH vrijednosti, kiseonika i drugih parametara u procesu fermentacije groždanog kljuka, što bi značajno olakšalo rad malih i srednjih vinarija, koje se često suočavaju sa nedostatkom stručnog kadra i resursa. Takođe, uvođenjem aktuatora sistem bi mogao automatski da reguliše temperature, količinu CO₂ i druge uslove u kojima se odvija proces fermentacije, povećavajući autonomiju procesa. Ovaj rad pruža osnovu za dalji razvoj i implementaciju tehnologija industrije 4.0 u oblasti vinogradarstva i tradicionalne proizvodnje vina.

Prototip razvijen u ovom radu može poslužiti kao temelj za slična istraživanja i unapređivanja na Biotehničkom fakultetu, omogućavajući dalju modernizaciju proizvodnje uz očuvanje tradicije. Tradicionalna proizvodnja vina nosi sa sobom nasljeđe i identitet, posebno u državama sa dugom vinarskom tradicijom poput Crne Gore. Implementacija savremenih IoT sistema doprinosi očuvanju ovih kulturnih aspekata, istovremeno donoseći tehnološke prednosti.

7. Literatura

- [1] David Hanes, Gonzalo Salgueiro , Patrick Grossetete , Robert Barton, Jerome Henry. IoT Fundamentals: Networking Technologies, Protocols, and Use Cases for the Internet of Things [Online]. 800 East 96th Street Indianapolis, IN 46240 USA: Cisco Press; 2017. Available from: <http://dx.doi.org/LibraryofCongressControlNumber:2017937632ISBN-13:978-1-58714-456-1ISBN-10:1-58714-456-5>
- [2] Pajovic Scepanovic, Radmila & Raicevic, Danijela & Popovic, Tatjana & Sivilotti, Paolo & Lisjak, Klemen & Vanzo, Andreja. Polyphenolic Characterisation of Vranac, Kratosija and Cabernet Sauvignon (Vitis vinifera L. cv.) Grapes and Wines from Different Vineyard Locations in Montenegro. South African Journal for Enology and Viticulture. 35. 139–148. 10.21548/35-1-994.;
- [3] “ThingSpeak” <https://thingspeak.mathworks.com/> [Online].
<https://thingspeak.mathworks.com/channels> [Posjećeno: 25.08.2024].
- [4] Xia, F., Yang, L. T., Wang, L., & Vinel, A. Internet of Things. International Journal of Communication Systems, 25(9), 1101–1102. INTERNATIONAL JOURNAL OF COMMUNICATION SYSTEMS Int. J. Commun. Syst. 2012; 25:1101–1102 Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). DOI: 10.1002/dac.2417;
- [5] Internet of things Architecture and Design Principles. (n.d.) [Online]. Available from: <https://pg.its.edu.in/sites/default/files/KCA043%20Internet%20of%20things%20-IoT%20by%20Raj%20Kamal%20Text%20Book.pdf>.
- [6] Bonomi, F., Milito, R., Zhu, J., & Addepalli, S. “Fog Computing and Its Role in the Internet of Things” [Online]. 2012. Available from: <http://dx.doi.org/10.1145/2342509.2342513>
- [7] Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. “Edge Computing: Vision and Challenges” IEEE Internet of Things Journal, [Online]. 2016 Oct;3(5):1–1. Available from: <http://dx.doi.org/10.1109/JIOT.2016.2579198>
- [8] Al-Fuqaha, Ala & Guizani, Mohsen & Mohammadi, Mehdi & Aledhari, Mohammed & Ayyash, Moussa. “Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications.” in IEEE Communications Surveys & Tutorials, [Online]. Fourthquarter 2015;17, no. 4, pp. 2347–2376,. Available from: <http://dx.doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095>
- [9] Kumar, S., Tiwari, P. & Zymbler, M. Internet of Things is a revolutionary approach for future technology enhancement: a review. J Big Data 6, 111 [Online]. 2019; Available from: <http://dx.doi.org/10.1186/s40537-019-0268-2>
- [10] Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S. and Palaniswami, M. Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions. Future Generation Computer Systems., SCIRP [Online]. 2013;29, 1645–1660. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>
- [11] Al-Fuqaha, Ala & Guizani, Mohsen & Mohammadi, Mehdi & Aledhari, Mohammed & Ayyash, Moussa. “Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications.” in IEEE Communications Surveys & Tutorials, [Online]. Fourthquarter 2015;17, no. 4, pp. 2347–2376,. Available from: <http://dx.doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095>

- [12] Shi, Weisong & Cao, Jie & Zhang, Quan & Li, Youhuizi & Xu, Lanyu. Edge Computing: Vision and Challenges. IEEE Internet of Things Journal [Online]. 2016 Oct;3. 1–1. Available from: <http://dx.doi.org/10.1109/JIOT.2016.2579198>
- [13] Atzori, Luigi & Iera, Antonio & Morabito, Giacomo. The Internet of Things: A survey, Comput. Netw. 2010;54,(15,). Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>
- [14] “Internet of Things” <https://www.mcloud.rs/blog/internet-of-things-iot/>.
- [15] Sicari, S., Rizzardi, A., Grieco, L. A., & Coen-Porisini, A. “Security, Privacy and Trust in Internet of Things: The Road Ahead”. Computer Networks,. 2015 Jan;76;(Pages 146–164, ISSN 1389–1286,). Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2014.11.008>
- [16] Ismail Adeleke, Nnamdi Nwulu, Oluwafemi Ayodeji Adebo. Internet of Things (IoT) in the food fermentation process: A bibliometric review,. Journal of Food Process Engineering. 2023 May;46(5).
- [17] Gilchrist A. Industry 4.0: The Industrial Internet of Things [Online]. Thailand; 2016. Available from: <http://dx.doi.org/DOI10.1007/978-1-4842-2047-4>
- [18] Rajkumar Buyya and Amir Vahid Dastjerdi . Internet of Things: Principles and Paradigms Book. 2016.
- [19] Milic, Sasa & Veinović, Slavko & Ponjavic, Milan. Industrijski internet stvari (IIoT) – strategije i koncepti. In Jahorina 2020 At: Jahorina – Republika Srpska; 2020. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/344634279>
- [20] Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. Precision Agriculture and Food Security. Science327(5967), 828–831. Science (New York, N.Y.). 327. 828–31. 10.1126/science.1183899. 2010 Feb; Available from: <http://dx.doi.org/10.1126/science.1183899>
- [21] M. Bajčeta, P. Sekulić, B. Krstajić, S. Djukanović and T. Popović: „A private IoT Cloud platform for precision agriculture and ecological monitoring“, IcETRAN, Zlatibor, 2016.
- [22] T. Popović, N. Latinović, A. Pešić, Ž. Zečević, B. Krstajić and S. Djukanović, „Architecting an IoT-enabled platform for precision agriculture and ecological monitoring: A case study“, Computers and Electronics in Agriculture, Volume 140, August 2017, Pages 255–265, ISSN: 0168–1699, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.06.008>
- [23] Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. Big Data in Smart Farming – A review. Agricultural Systems, 153, 69–80. 2017 May; Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agry.2017.01.023>
- [24] Proffitt, T., R. Bramley, D. Lamb, and E. Winter. Precision Viticulture: A New Era in Vineyard Management and Wine Production [Online]. Ashford, Australia: Winetitles Pty Ltd; 2006. Available from: <http://books.google.com.au/books?id=I1xwAgAACAAJ&dq=097568504X>
- [25] Bramley R. G. V. HRP. Understanding variability in winegrape production systems. 1. Within vineyard variation in yield over several vintages. Australian Journal of Grape and Wine Research [Online]. 10(1):(32–45). Available from: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1755-0238.2004.tb00006.x>

- [26] VitiGEOSS, Horizon 2020 funded project developing a vineyard management tool based on Earth Observation Services [Online]. European Union's Horizon 2020 research and innovation programme; 2020 Sep. Available from: <https://vitiqeoss.eu/download/executive-summary/>
- [27] Trifun Savić, "Razvoj rješenja za realizaciju sistema za pametno navodnjavanje", Magistarski rad, ETF; UCG, 2017
- [28] Tardaguila, J., Stoll, M., Gutiérrez, S., Proffitt, T., Diago, M.P. Smart applications and digital technologies in viticulture: A review, Smart Agricultural Technology, 1, 100005,. Smart Agricultural Technology [Online]. 2021 Dec;1(1), 100005. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.atech.2021.100005>
- [29] Jackson R. Wine Science: Principles and Applications. Third Edition. San Diego, California 92101–4495, USA: Academic Press is an imprint of Elsevier; 2008.
- [30] Che Wun Chiou, Sih–Ze Huang, Yuh–Sien Sun, A Mobile Control System of Fermentation Temperature on Winemaking – International Journal of Food Science and Agriculture, 2022, 6(4), 372–378
- [31] Sablayrolles, J.M. (2009). Control of alcoholic fermentation in winemaking: Current situation and prospect, Food research International, 42 (4), 418–424, <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2008.12.016>
- [32] Boulton, R. (2003). Red Wines. Fermented Beverage Production, 107–137. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4615-0187-9_6
- [33] Parks B. Fermentation Temperature Control. Brew Your Own [Online]. May–June 2013; Available from: <https://byo.com/article/fermentation-temperature-control/>
- [34] Popovic, Goran & Djukanovic, Goran. (2022). Primjena IoT tehnologija u proizvodnji vina application of IoT technologies in the wine production, Stručni rad, X međunarodni naučni skup, Sigurnost i kvalitet hrane, Brčko.
- [35] Raicevic, D., Popovic, T., a Ivanova–Petropulos, V., Petreska Stanoeva, J., Maras, M. (2020). HPLC–DAD–ESI/MS Monitoring of Stilbenes Content in Vranac Red Wines Produced with Traditional and Modern Fermentation Methods, Macedonian Journal of Chemistry and Chemical Engineering, 39 (1), 49–58, [doi: https://doi.org/10.20450/mjcce.2020.1970](https://doi.org/10.20450/mjcce.2020.1970)
- [36] D'Amore, T., Russell, I., & Stewart, G. G. (1989). "Temperature and Ethanol Tolerance of Yeast." Journal of Industrial Microbiology, 4(4), 291–297
- [37] BIO Web of Conferences 56, 02034 (2023) <https://doi.org/10.1051/bioconf/20235602034> 43rd World Congress of Vine and Wine.
- [38] G. Ch. Lainioti, J. Kapolos, A. Koliadima & G. Karaiskakis (2011) The study of the effect of fermentation temperature on the growth kinetics of saccharomyces cerevisiae yeast strain, in the presence or absence of support, by chromatographi techniques, journal of liquid chromatography & related technologies, 34:3, 195–208, <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10826076.2011.546155>
- [39] Lu, Y., Peh, J. C. H., Lee, P.–R., & Liu, S.–Q. (2017). Modulation of grape wine flavor via the sequential inoculation of Williopsis saturnus and Saccharomyces cerevisiae. Food Biotechnology, 31(4), 245–263. <https://doi.org/10.1080/08905436.2017.1369434>
- [40] Stanbury, P. F., Whitaker, A., & Hall, S. J. (2016). Principles of Fermentation Technology. Elsevier.

- [41] “Arduino Uno” Dostupno na: https://bs.wikipedia.org/wiki/Arduino_UNO [Online]. [Posjećeno: 10.10.2024].
- [42] “Arduino” <https://www.arduino.cc> [Online]. Dostupno na: <https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3?> [Posjećeno: 15.10.2024].
- [43] “DS18B20 vodootporni temperaturni sensor” Dostupno na: <http://ba.heaterbastor.com/ds18b20/ds18b20-waterproof-temperature-sensor.html> [Posjećeno: 17.10.2024].
- [44] Raicevic D. Bozinovic Z., Petkov M., Ivanova–Petropulos V., Kodzulovic V., Mugosa M., Sucur S., Maras V., Polyphenolic content and sensory profile of Montenegrin Vranac wines produced with different oenological products and maceration, *Macedonian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, Vol. 36, No. 2, pp. 229–238 (2017).
- [45] Pajović Šćepanović R., Wendelin S., Raičević D. and Eder R. (2019), Characterization of the phenolic profile of commercial Montenegrin red and white wines, *European Food Research and Technology*, <https://doi.org/10.1007/s00217-019-03330-z> Volume: 245, Issue: 10, Pages 2233–2245

8. Dodatak

Kod (1) – programiranje mikrokontrolera Arduino UNO napisan u programskom jeziku C++ sa dodatnim bibliotekama koje olakšavaju rad sa senzorima, aktuatorima i drugim komponentama.

Biblioteke korištene u kodu za podršku komponentama u Arduino okruženju:

```
#include <SPI.h>
#include <Ethernet.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
```

Definisanje parametara i inicijalizacija

```
// Unesite MAC adresu vašeg Ethernet shield-a (obično se nalazi na nalepnici)
byte mac [] = { 0xDE, 0xAD, 0xBE, 0xEF, 0xFE, 0xED };

// Unesite IP adresu ako koristite statičku IP adresu (opciono)
IPAddress ip(192, 168, 1, 177);

// ThingSpeak server
char server [] = "api.thingspeak.com";

// API Key za pisanje podataka na vaš kanal
String apiKey = "0CY42F000H5G0Y9V"; // Zamenjeno sa vašim API ključem

// Pin na kojem su DS18B20 senzori povezani
#define ONE_WIRE_BUS 2
```

Inicijalizacija objekata za rad sa senzorima i Ethernet-om

```
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);

// Ethernet client objekat
EthernetClient client;
```

Setup funkcija

```
void setup() {  
    // Pokretanje serijske komunikacije  
    Serial.begin(9600);  
  
    // Pokretanje Ethernet-a  
    if (Ethernet.begin(mac) == 0) {  
        Serial.println("Ethernet shield nije pronađen. Koristim statičku IP adresu.");  
        Ethernet.begin(mac, ip);  
    }  
  
    // Pauza za inicijalizaciju  
    delay(1000);  
    Serial.println("Povezivanje na mrežu...");  
  
    // Pokretanje senzora  
    sensors.begin();  
}
```

Loop funkcija

```
void loop() {  
    // Slanje komande za očitavanje temperature  
    sensors.requestTemperatures();  
  
    // Očitavanje temperatura  
    float temp1 = sensors.getTempCByIndex(0);  
    float temp2 = sensors.getTempCByIndex(1);  
    float temp3 = sensors.getTempCByIndex(2);  
  
    // Ispisivanje temperatura u Serial Monitor  
    Serial.print("Temp 1: ");  
    Serial.println(temp1);  
    Serial.print("Temp 2: ");  
    Serial.println(temp2);  
    Serial.print("Temp 3: ");  
    Serial.println(temp3);  
}
```

Povezivanje i slanje podataka na ThingSpeak platformu

```
// Povezivanje na ThingSpeak

if (client.connect(server, 80)) {
  String postStr = apiKey;
  postStr += "&field1=";
  postStr += String(temp1);
  postStr += "&field2=";
  postStr += String(temp2);
  postStr += "&field3=";
  postStr += String(temp3);
  postStr += "\r\n\r\n";

  client.print("POST /update HTTP/1.1\n");
  client.print("Host: api.thingspeak.com\n");
  client.print("Connection: close\n");
  client.print("X-THINGSPEAKAPIKEY: " + apiKey + "\n");
  client.print("Content-Type: application/x-www-form-urlencoded\n");
  client.print("Content-Length: ");
  client.print(postStr.length());
  client.print("\n\n");
  client.print(postStr);

  Serial.println("Podaci su poslani na ThingSpeak");
}

client.stop();
```

Pauza između očitavanja

```
// Pauza od 10 sekundi (ThingSpeak dozvoljava maksimalno 15 ažuriranja u 1 minuti)
delay(10000);
}
```

Kod (2) – koristeći MATLAB integraciju sa ThingSpeak-om za praćenje temperature i slanje upozorenja putem e-maila kada temperatura odstupa od unaprijed definisanih granica možemo koristiti sljedeći kod:

```
>> % Pohrani ID kanala za senzor temperature.
channelID = 2640387;

% Unesi API ključ za ThingSpeak upozorenja. Svi API ključevi za upozorenja počinju
sa TAK.
alertApiKey = 'TAKZ7HfGD0pzGwcrCFj';

% Postavi adresu za HTTP poziv
alertUrl = "https://api.thingspeak.com/alerts/send";

% webwrite koristi weboptions za dodavanje potrebnih zaglavlja. Upozorenja
zahtijevaju
% zaglavlje ThingSpeak-Alerts-API-Key.
options = weboptions("HeaderFields", ["ThingSpeak-Alerts-API-Key", alertApiKey]);

% Postavi predmet email-a.
alertSubject = "Informacije o temperaturi kljuka";
```

Funkcija checkTemperature čita temperature sa ThingSpeak kanala, provjerava ih i, ako su van granica, šalje upozorenje putem HTTP poziva.

```
% Definiši funkciju za provjeru temperature
function checkTemperature(channelID, alertUrl, alertSubject, options)
    disp('Početak funkcije checkTemperature'); % Debugging

    % Pročitaj najnovije vrijednosti temperature iz Polja 1, 2 i 3.
    try
        disp('Pokušavam čitati podatke s ThingSpeak...'); % Debugging
        temp_dno = thingSpeakRead(channelID, 'Fields', 1, 'NumPoints', 1);
        temp_sredina = thingSpeakRead(channelID, 'Fields', 2, 'NumPoints', 1);
        temp_vrh = thingSpeakRead(channelID, 'Fields', 3, 'NumPoints', 1);

        if isempty(temp_dno) || isempty(temp_sredina) || isempty(temp_vrh)
            error('Nema učitanih podataka o temperaturi.');
```

```
        end

        disp( ['Najnovija vrijednost temperature za Dno bureta: ', num2str(temp_dno)]); %
Debugging
        disp( ['Najnovija vrijednost temperature za Sredinu bureta: ',
num2str(temp_sredina)]); % Debugging
        disp( ['Najnovija vrijednost temperature za Vrh bureta: ', num2str(temp_vrh)]); %
Debugging
    catch readException
        fprintf('Greška pri čitanju sa ThingSpeak: %s\n', readException.message);
        return;
    end
```

Funkcija thingSpeakRead čita najnovije podatke sa kanala, uzimajući vrijednosti temperature sa dna, sredine i vrha fermentacionog suda (polja 1, 2. i 3.).

```
% Provjeri da li je očitana vrijednost u bilo kojem polju ispod 15°C ili iznad 29°C.
if temp_dno > 29 || temp_sredina > 29 || temp_vrh > 29
    alertBody = sprintf('Upozorenje: Temperatura je iznad 29°C u jednom od polja! \nDno bureta: %.2f°C \nSredina bureta: %.2f°C \nVrh bureta: %.2f°C', temp_dno, temp_sredina, temp_vrh);
    disp('Temperatura je iznad 29°C u jednom od polja, šaljem upozorenje...'); % Debugging
elseif temp_dno < 15 || temp_sredina < 15 || temp_vrh < 15
    alertBody = sprintf('Upozorenje: Temperatura je ispod 15°C u jednom od polja! \nDno bureta: %.2f°C \nSredina bureta: %.2f°C \nVrh bureta: %.2f°C', temp_dno, temp_sredina, temp_vrh);
    disp('Temperatura je ispod 15°C u jednom od polja, šaljem upozorenje...'); % Debugging
else
    disp('Temperatura je u normalnim granicama u svim poljima.');
```

Ako bilo koja vrijednost pređe kritičnu temperaturu, funkcija postavlja tijelo upozorenja (alertBody) i priprema ga za slanje.

Funkcija webwrite šalje HTTP POST zahtjev na alertUrl sa temom i tijelom upozorenja.

```
disp('Pokušavam slati upozorenje...'); % Debugging
try
    response = webwrite(alertUrl, "body", alertBody, "subject", alertSubject, options);
    disp('Upozorenje poslato.');
```