

Modeliranje i simulacija sustava za održavanje kvalitete vode u bazenu

Antunović, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:013267>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-07**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ivan Antunović

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Miheal Cipek, dipl. ing.

Student:

Ivan Antunović

Zagreb, 2024.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru doc. Dr. sc. Mihealu Cipeku na pruženoj pomoći i savjetima tijekom izrade ovog završnog rada.

Ivan Antunović



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ivan Antunović** JMBAG: **0035239596**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Modeliranje i simulacija sustava za održavanje kvalitete vode u bazenu za kupanje**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Modelling and simulation of a system for maintaining water quality in a swimming pool**

Opis zadatka:

Kvaliteta vode u bazenu za kupanje se postepeno smanjuje, pogotovo prilikom korištenja što može imati negativan utjecaj na zdravlje korisnika, a u nekim slučajevima može dovesti i do oštećenja bazenske opreme zbog korozije. Stoga je potrebno kontinuirano pratiti kvalitetu vode te prema potrebi redovito dodavati potrebna sredstva ili izmijeniti vodu. Ovaj rad se bavi modeliranjem automatskog sustava za održavanje kvalitete vode u bazenu. U zadatku je potrebno:

- opisati problem i načine održavanja kvalitete vode u bazenu
- izraditi računalni model narušavanja kvalitete vode bazena
- predložiti sustav za automatsko održavanje kvalitete vode u bazenu
- provesti računalne simulacije rada sustava
- na temelju rezultata dati zaključak i eventualne smjernice za poboljšanja.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

24. 4. 2024.

Datum predaje rada:

2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

Predviđeni datumi obrane:

2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Zadatak zadao:

doc. dr. sc. Mihael Cipek

Predsjednik Povjerenstva:

izv. prof. dr. sc. Petar Čurković

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. MATEMATIČKI MODEL PRLJANJA VODE U BAZENU	3
2.1 Matematički model promjene pH vrijednosti	3
2.2 Matematički model promjene količine klora.....	5
2.3 Matematički model mijenja ORP	7
3. SUSTAV ZA ODRŽAVANJE KVALITETE VODE U BAZENU	9
3.1 Komponente sustava za održavanje kvalitete vode u bazenu.....	10
3.1.1 Izbor senzora za pH vrijednost	10
3.1.2 Izbor senzora za mjerenje količine klora.....	12
3.1.3 Izbor senzora za mjerenje ORP	14
3.1.4 Izbor filtera	16
3.2 Vođenje sustava pomoću PLC-a.....	18
3.2.1 Tablica adresa	20
3.2.2 Ladder dijagram.....	21
3.2.3 HMI	27
4. SIMULACIJE RADA SUSTAVA	28
4.1 Simulacija promjene pH razine	28
4.2 Simulacija promjene ORP-a	30
4.3 Simulacija promjene klora.....	31
4.4 Analiza simulacija i moguća poboljšanja	32
5. ZAKLJUČAK.....	33
6. LITERATURA	34
7. PRILOZI.....	35

POPIS SLIKA

Slika 1. Olimpijski bazen	2
Slika 2: Graf promjene pH vrijednosti kroz 24h(Noć)	4
Slika 3: Graf promjene pH vrijednosti kroz 24h(Dan)	5
Slika 4: Graf promjene razine klora kroz 24h	6
Slika 5: Graf promjene ORP-a kroz 24h	8
Slika 6: Shematski prikaz sustava	9
Slika 7: Shematski prikaz pH senzora [5]	11
Slika 8: Senzor ZW03 [6]	11
Slika 9: Tehničke specifikacije senzora [6]	12
Slika 10: memosens CCS51E [8]	13
Slika 11: Tehničke specifikacije za Memosens CCS51E [9]	13
Slika 12: Shematski prikaz ORP senzora [10]	14
Slika 13: Winsen MW-ORP101 [10]	15
Slika 14: Tehničke specifikacije za Winsen MW-ORP101 [11]	15
Slika 15: Pješčani filter [12]	16
Slika 16: Filter s uloškom [12]	17
Slika 17: Dijatomejski filter [12]	18
Slika 18: PLC S7-1500 [13]	19
Slika 19: TIA Portal [13]	19
Slika 20: Tablica adresa	20
Slika 21: Start/Stop	21
Slika 22: Inicijalizacija analognih senzora	22
Slika 23: Regulacija pH vrijednosti	23
Slika 24: Regulacija ORP i Klora	24
Slika 25: Inicijalizacija senzora za količine kemikalija	25
Slika 26: Alarmi za male količine kemikalija u spremnicima	26
Slika 27: HMI	27
Slika 28: Regulacija pH vrijednosti kroz 12h(Noć)	29
Slika 29: Regulacija pH vrijednosti kroz 12h(Dan)	29
Slika 30: Promjena ORP kroz 24h	30
Slika 31: Promjena klora kroz 24h	31

POPIS TABLICA

Tablica 1. Parametri vode u bazenu [2,3] 8

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
<i>C</i>	Mg/L	Količina klora
<i>k_{cl}</i>	1/h	Konstanta raspada klora
<i>k_{org}</i>	1/h	Konstanta promjene pH vrijednosti zbog organskih materijala
<i>k_{CO2}</i>	1/h	Konstanta promjene pH zbog CO ₂
<i>k_{bicarb}</i>	1/h	Konstanta promjene pH zbog natrijevog bikarbonata
<i>pH</i>	-	pH vrijednost
<i>B</i>	Mg/l	Količina natrijevog bikarbonata
<i>R</i>	Mg/l	Količina reduciranih tvari
<i>k_{rr}</i>	1/h	Konstanta razgradnje reduciranih tvari
<i>k_{kk}</i>	1/h	Konstanta konverzije klora
<i>k_{rrORP}</i>	mV/(mg/L)	Konstanta konverzije reduciranih tvari u ORP
<i>Q_i</i>	Mg/L	Količina dodanog klora

SAŽETAK

Kroz javne kupaće bazene cirkulira velik broj korisnika stoga je potrebno održavati kvalitetu vode takvog bazenskog sustava. Ručno održavanje bi zahtijevalo iznimno velik trud stoga se u današnje vrijeme sve više primjenjuje automatsko održavanje kvalitete vode u bazenu pomoću programibilnog logičkog kontrolera (PLC). U ovom radu je predloženo rješenje jednog takvog sustava. Izrađen je računalni model te je simuliran njegov rad te je na kraju predložen program za PLC.

Ključne riječi: kupaći bazen, kvaliteta vode, automatska regulacija, modeliranje, simulacija

SUMMARY

A large number of users circulate through public swimming pools, so it is necessary to maintain the water quality of such a pool system. Manual maintenance would require an extremely large effort, therefore nowadays automatic maintenance of water quality in the swimming pool using a programmable logic controller (PLC) is increasingly used. In this paper, a solution for such a system is proposed. A computer model was created and its operation was simulated, and at the end a program for PLC was proposed.

Key words: swimming pool, water quality, automatic regulation, modeling, simulation

1. UVOD

Postoje mnoge vrste bazena, od onih koji su namijenjeni za sport kao što su plivanje, vaterpolo i sl., dječjih bazena do onih za rashlađivanje i opuštanje. Regulacija kvalitete vode u bazenima oduvijek je bila važan zadatak kako bi se osigurala sigurnost i zdravlje korisnika. U prošlosti, održavanje kvalitete vode oslanjalo se na osnovne metode poput ručnog dodavanja kemikalija, povremenog ispitivanja vode te fizičkog čišćenja bazena. Ove tradicionalne metode često su bile neučinkovite zbog nedosljednosti u primjeni i poteškoća u održavanju optimalnih uvjeta, što je rezultiralo čestim promjenama u kvaliteti vode, razvojem mikroorganizama i stvaranjem neugodnih uvjeta za kupaće. Danas je regulacija kvalitete vode u bazenima značajno napredovala zahvaljujući napretku tehnologije i razvoju novih metoda kontrole. Moderni bazeni opremljeni su automatiziranim sustavima za praćenje i regulaciju ključnih parametara, poput pH vrijednosti, koncentracije klor, oksidacijsko-redukcijskog potencijala (ORP), te prisutnosti raznih zagađivača [1]. Senzori i automatizirani dozirni sustavi omogućuju stalno praćenje kvalitete vode u stvarnom vremenu i automatsko prilagođavanje kemikalija, čime se održava sigurna i stabilna razina kvalitete vode. Poboljšanje regulacije kvalitete vode u bazenima ne samo da doprinosi većoj sigurnosti korisnika, već i smanjuje operativne troškove kroz optimizaciju potrošnje kemikalija i energije, te produžava vijek trajanja opreme. Stoga se u ovom radu fokusira na regulaciju kvalitete vode, tako da se prati pH vrijednost, rezidualni klor, zamućenost te ORP (oksidacijsko-redukcijski potencijal) i u skladu s mjerenjima dodaju druge kemikalije. Kako bi odradili simulaciju, napravljen je matematički model prljanja vode, te su simulacije izvedene korištenjem programa matlab, a za cijeli sustav dan je prijedlog programskog koda za PLC.



Slika 1. Olimpijski bazen

2. MATEMATIČKI MODEL PRLJANJA VODE U BAZENU

S obzirom na to da postoje razne veličine i oblici bazena koji imaju potrebu za ovakvim sustavom, u radu je predložen matematički model koji opisuje brzinu prljanja vode kako bi se sva oprema potrebna za regulaciju mogla odabrati.

2.1 Matematički model promjene pH vrijednosti

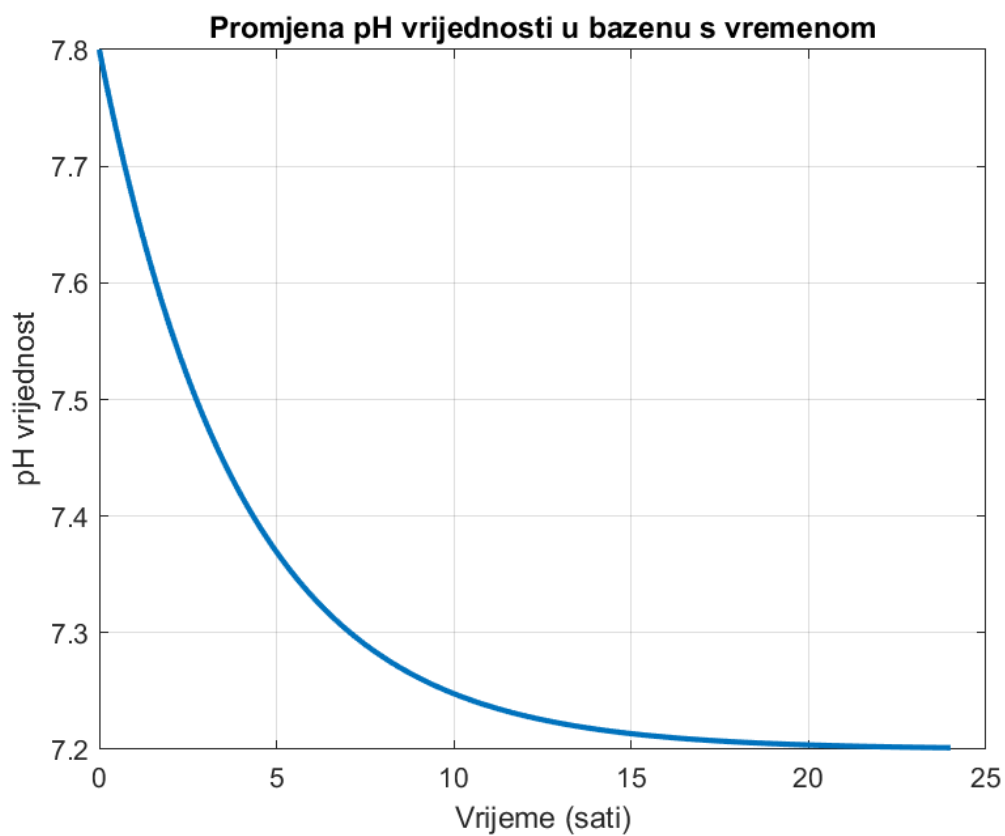
pH vrijednost je broj koji nam govori o tome je li voda alkalna (ako je vrijednost veća od 7) ili je kisela (ako je vrijednost manja od 7). Čista voda ima pH vrijednost 7 i onda je neutralna, no voda koju dobivamo iz vodovoda najčešće ima pH vrijednost između 6,5 i 8,5 (u prosjeku 7,5). Dodavanjem klora i drugih kemikalija za ubijanje bakterija i algi bazen postaje siguran za kupanje. Cilj je postići pH vrijednost malo iznad neutralne. pH vrijednost bazena mijenja se ovisno o količini ljudi koji koriste bazen, vremenu, tvrdoći vode koja se dolijeva, filtracijskom sustavu... Ako je pH vrijednost previsoka (iznad 7,8) vode može postati mutna, napraviti štetu na samom bazenu, uzrokovati suhu i nadraženu kožu, smanjiti sposobnost klora da uništava bakterije, a ako je pH vrijednost preniska (ispod 7,2) može doći do iritacije očiju, štete na bazenu, hrđe na metalnim dijelovima kao što su pumpe, ljestve i sl. Kako bi se pH vrijednost balansirala, potrebno je koristiti alkalnu otopinu kako bi se povisila vrijednost (npr. Natrijev bikarbonat), dok za spuštanje je potrebna neka kisela otopina (npr. Natrijev hidrogen sulfat) [1].

$$\frac{dpH}{dt} = -k_{cl} C_{cl}(t) + k_{org} (pH_0 - pH(t)) + k_{CO_2} (pH_{max} - pH(t)) + k_{bicarb} B(t) \quad (1)$$

gdje je k_{cl} konstanta koja opisuje promjenu pH uslijed dodavanja klora, $C_{cl}(t)$ koncentracija klora u trenutku t , k_{org} konstanta koja opisuje brzinu smanjenja pH zbog organskih materijala, k_{CO_2} konstanta koja opisuje promjenu pH zbog gubitka CO_2 , k_{bicarb} konstanta koja opisuje promjenu pH zbog dodavanja bikarbonata.

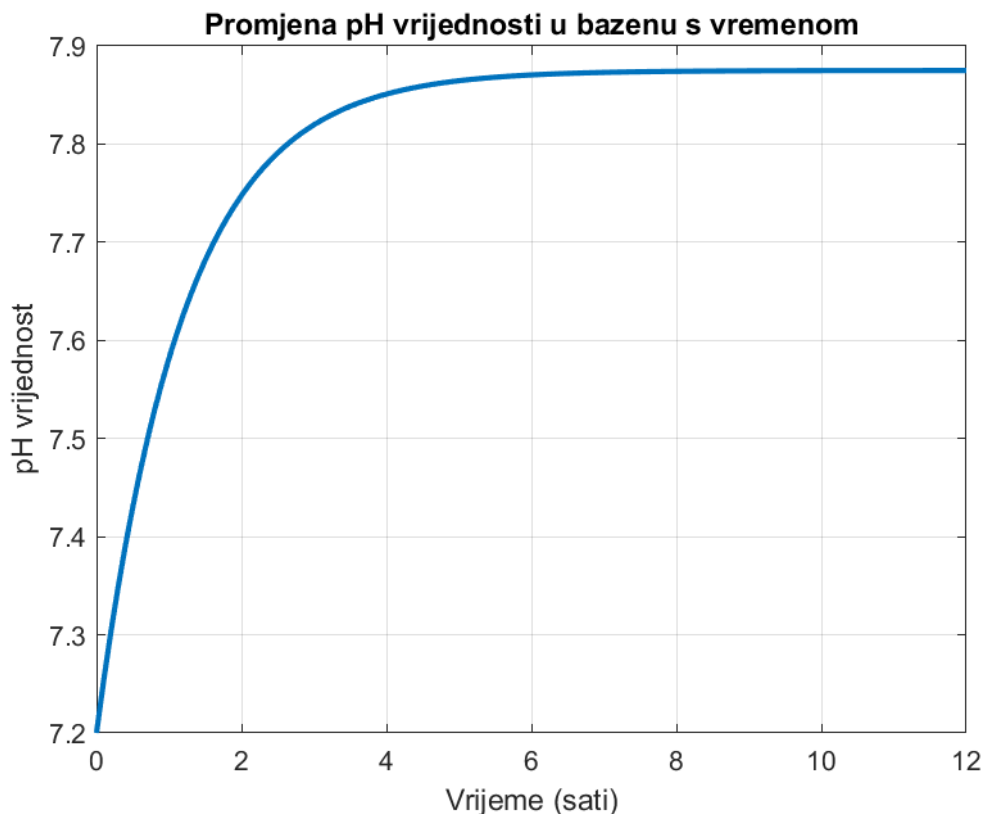
Konstante koje se koriste u matematičkom modelu ovise o puno faktora, UV zračenju, količini vode, temperaturi, vremenu (kiša, snijeg), lišću itd., stoga se te vrijednosti najčešće dobivaju eksperimentalnim putem. Za potrebe ovog rada korištene su vrijednosti koje su dane u tablici 1. i koje ostvaruju realistično vrijeme promjene pH vrijednosti kroz 24h

Na dijagramu na slici 2 prikazana je promjena vrijednosti pH kroz jedan dan pri kojoj je razmatran utjecaj CO₂ i organskih materijala.



Slika 2: Graf promjene pH vrijednosti kroz 24h(Noć)

Slika 3 pokazuje promjenu pH vrijednosti kroz 24h. Ovo bi bila promjena pH vrijednosti kada bi koeficijent promjene CO_2 bio velik, odnosno kada bi bilo puno ljudi u bazenu, radile bi prskalice, masažeri, tada bi količina CO_2 padala, a tako bi rasla pH vrijednost.



Slika 3: Graf promjene pH vrijednosti kroz 24h(Dan)

2.2 Matematički model promjene količine klora

Klor je sveopće poznat po svojim dezinfekcijskim svojstvima. Njegova svrha u bazenima je da učinkovito ubija bakterija, viruse i ostale mikroorganizme koji mogu uzrokovati bolesti i infekcije. Uz odlična svojstva za borbu protiv bolesti, klor također sprječava rast algi u bazenima što vodu čini čistom i smanjuje potrebu za promjenom vode. Klor radi na način da reagira s nečistoćama u bazenu kao što su znoj, urin, koža koje kupaci unesu u vodu, te ih oksidira i pretvara u bezopasne nusprodukte. Iako koncentracije klora koja se koriste u bazenu nisu opasne po ljude, može svejedno doći do iritacija kože, očiju i sl., stoga se razina klora treba redovno provjeravati i održavati je u određenim vrijednostima. Za klor je to između 1 i 3 parts per million(ppm). U svrhu ovog rada izrađen je matematički model koji će opisati promjenu količine klora kroz dane. Opisan je izrazom (2) [3,4].

$$\frac{dC(t)}{dt} = -k_{cl}C_{cl}(t) + I(t) \quad (2)$$

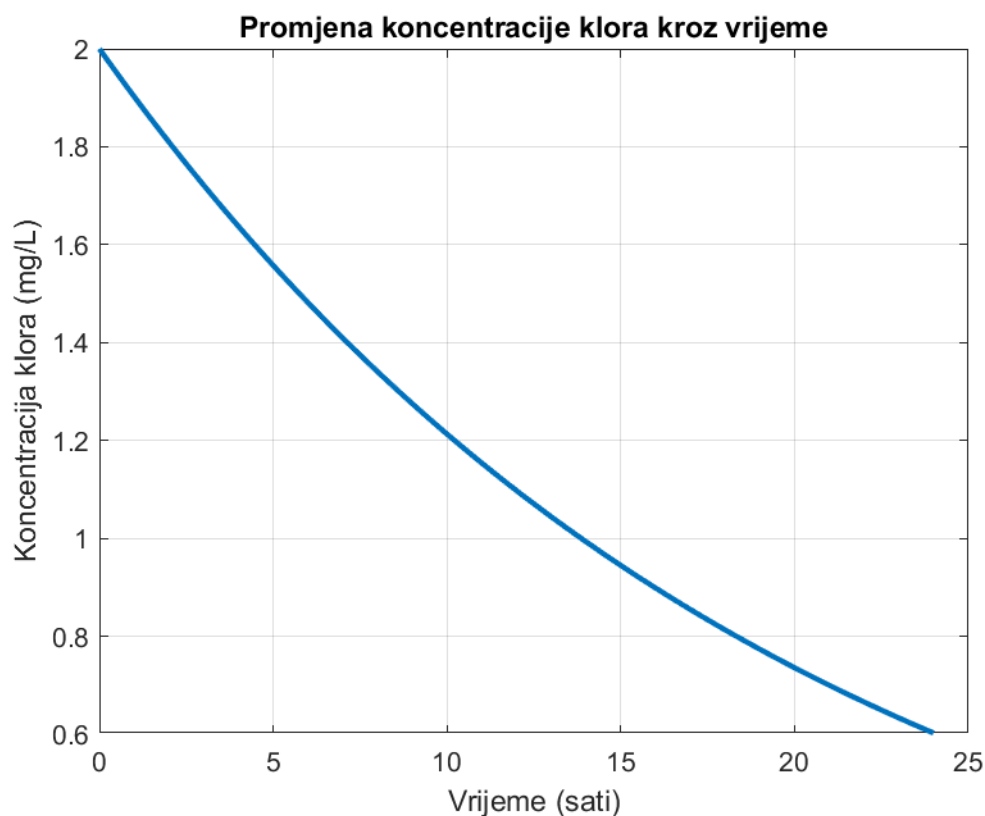
Gdje je k_{cl} konstanta raspada koja ovisi o uvjetima kao što su temperature i intenzitet UV zračenja čija je vrijednost dana u tablici 1, $I(t)$ funkcija dodavanja klora

$$C_{cl}(t) = C_0 e^{-k_{cl}t} \quad (3)$$

$$I(t) = \sum_{i=1}^n Q_i \delta(t - t_i) \quad (4)$$

Gdje je Q_i količina klora koja se dodaje, a $\delta(t - t_i)$ Diracova impulsna funkcija koja opisuje trenutak u kojem se dodaje klor.

Na slici 4 prikazana je promjena koncentracije klora kroz jedan dan, početna vrijednost klora je 2 mg/L, te kroz 24h padne na vrijednost od 0.6 mg/L.



Slika 4: Graf promjene razine klora kroz 24h

2.3 Matematički model mijenja ORP

Oksidacijski redukcijski potencijal (ORP), je mjera za oksidacijski kapacitet u vodi, ili jednostavnije govori nam o čistoći vode i njenoj sposobnosti da razgradi kontaminacije. Prvo se počelo koristi kod vode za piće, pa onda i za bazene da se odredi koliko je bazen siguran za upotrebu. Mjeri se na način da se u vodu uroni dvije elektrode koje mjere napon između njih te prema vrijednosti koja se dobije može se odrediti čistoća vode. Više o principu rada u poglavlju 3.1.2.1. Svjetska zdravstvena organizacija je odredila da je minimum napon između elektrodi 650 mV kako mi voda bila zdrava za piće, a ta vrijednost ne bi trebala prelaziti 800 mV, jer za veće vrijednosti znači da ima dosta klora što može biti štetno za zdravlje. U ovom radu izvest će se matematički model po kojem ćemo moći vidjeti kako se kroz vrijeme mijenja ORP. Na ORP kroz vrijeme utječe promjena koncentracije klora i reakcije oksidacije i redukcije u vodi [3,5].

ORP se može modelirati kao funkcije klora $C_{cl}(t)$ i reduciranih tvari $R(t)$.

Promjena koncentracije klora može se izračunati prema izrazu:

$$\frac{dC(t)}{dt} = -k_{cl}C_{cl}(t) \quad (5)$$

Gdje je k_{cl} konstanta raspada klora, $C_{cl}(t)$ vrijednost klora u trenutku t i dobije se iz izraza:

$$C_{cl}(t) = C_0 e^{-k_{cl}t} \quad (6)$$

Promjenu reduciranih tvari možemo izraziti preko izraza u nastavku:

$$\frac{dR(t)}{dt} = -k_{rr}R(t) + k_{kk}C_{cl}(t) \quad (7)$$

Gdje je k_{rr} brzina razgradnje reduciranih tvari, k_{kk} konstanta konverzije klora u reakcijama reduciranim tvarima i $R(t)$ količina reduciranih tvari u trenutku t i može se dobiti iz izraza:

$$R(t) = R_0 e^{-k_{rr}t} + \frac{k_{kk}}{k_{rr} - k_{kk}} C_0 (e^{k_{cl}t} - e^{k_{rr}t}) \quad (8)$$

Promjenu ORP-a može izračunati iz izraza:

$$ORP(t) = k_{rrORP}C_{cl}(t) - k_{kkORP}R(t) \quad (9)$$

Gdje su k_{rrORP} i k_{kkORP} koeficijenti konverzije reduciranih tvari odnosno klora u ORP

Uvrštavanjem u (6) i (8) u (9) dobije se:

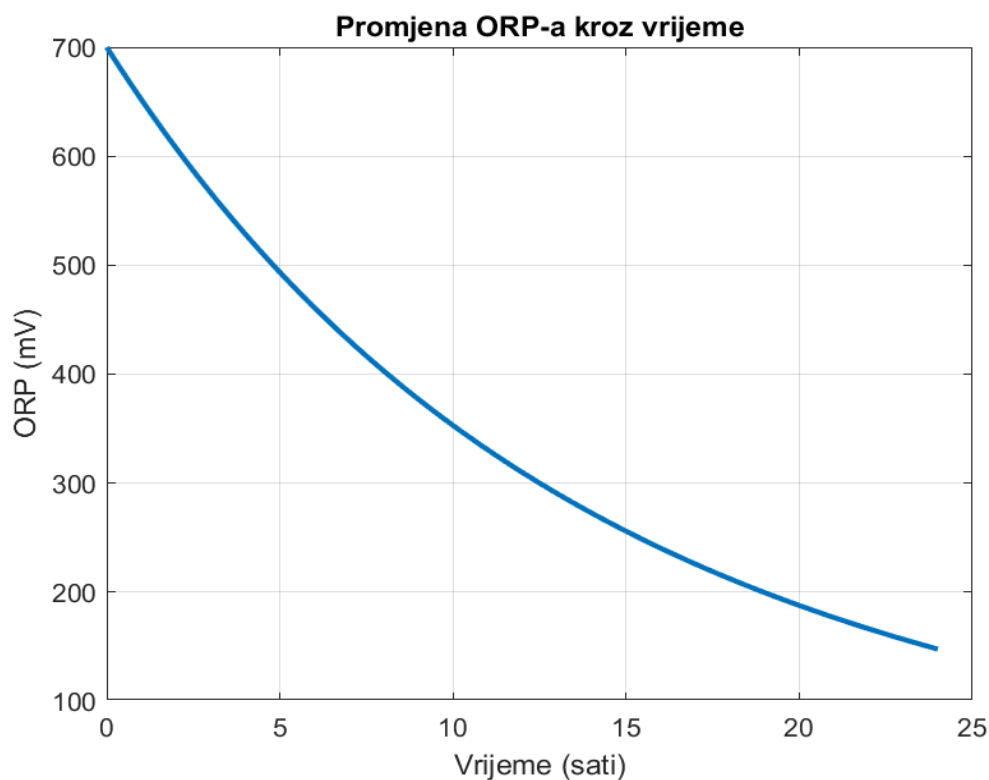
$$ORP(t) = k_{rrORP}C_0 e^{-k_{cl}t} - k_{kkORP} \left[R_0 e^{-k_{rr}t} + \frac{k_{kk}}{k_{rr} - k_{kk}} C_0 (e^{k_{cl}t} - e^{k_{rr}t}) \right] \quad (10)$$

Gdje su vrijednosti svih konstanti dane u tablici 1.

Tablica 1. Parametri vode u bazenu [2,3]

Veličina	Vrijednost
k_{cl} (dan/noć)	0,01 1/h
k_{org} (dan/noć)	0,07/0,05 1/h
k_{CO_2} (dan/noć)	0,04/0,02 1/h
k_{bicarb}	0,15 1/h
k_{rrORP}	400 mV/(mg/L)
k_{rr}	0,1 1/h
k_{kk}	0,05 1/h
k_{kkORP}	200 mV/(mg/L)

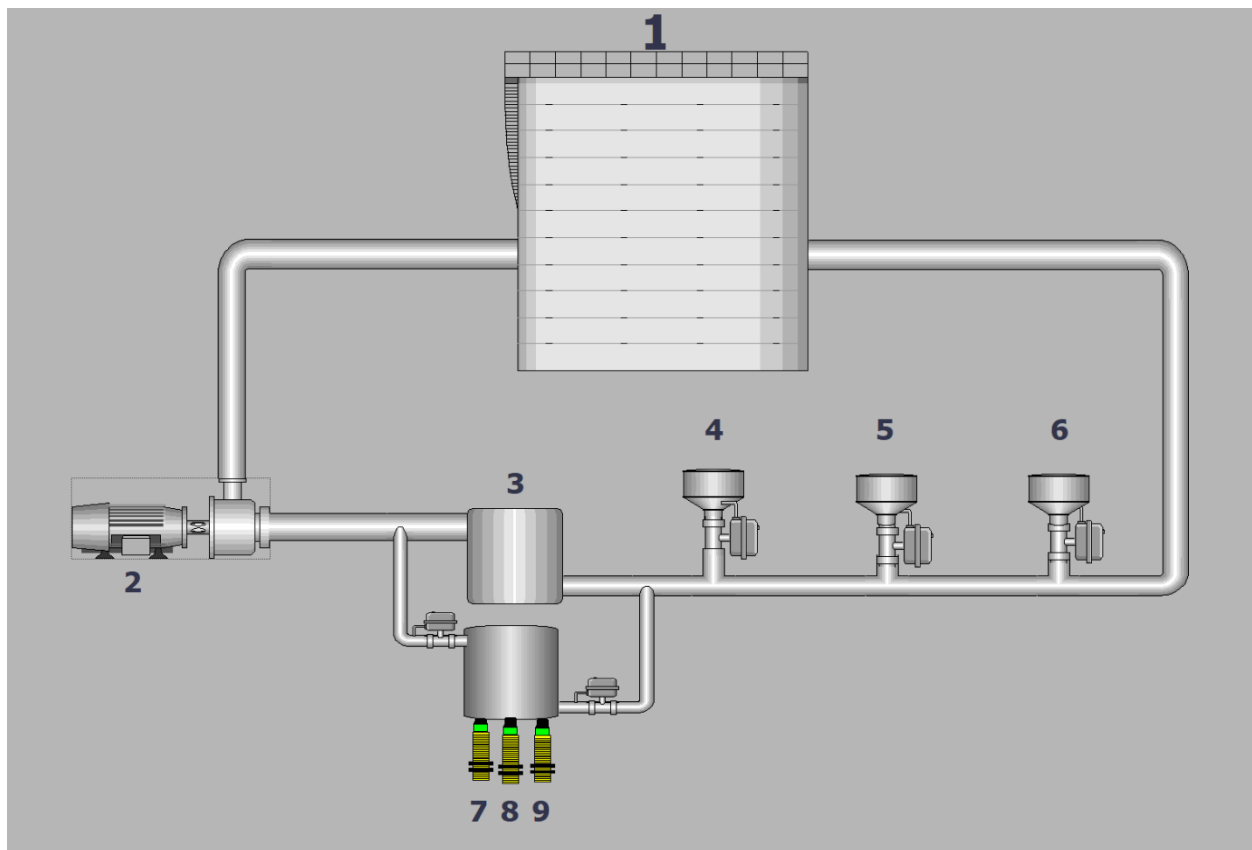
Slika 5 prikazuje promjenu ORP kroz jedan dan uz prosječne vrijednosti konstanti koje u praksi često variraju zbog raznih utjecaja.



Slika 5: Graf promjene ORP-a kroz 24h

3. SUSTAV ZA ODRŽAVANJE KVALITETE VODE U BAZENU

Shematski prikaz sustava za održavanje kvalitete vode u bazenu dan je na slici 6. Sastoji se od bazena, pumpe, filtera, senzora i aktuatora.



Slika 6: Shematski prikaz sustava

1. Bazen
2. Pumpa
3. Filter
4. Sustav za doziranje klor
5. Sustav za doziranje natrijevog bikarbonata
6. Sustav za doziranje natrijevog hidrogen sulfata
7. Senzor klor
8. pH senzor

Operaterski ljudski rad nije potreban osim za pokretanje samo sustava što se vrši preko HMI-a te za nadopunjavanje spremnika kemikalijama, koji su dovoljnog kapaciteta da se punjenje ne vrši često. Ovaj proces radi na način da postoje tri senzora, senzor za mjerenje pH vrijednosti, ORP-a te količine klor. Senzori su postavljeni u bazen, a vrijednosti koje očitavaju

šalju do PLC-a. Na PLC su spojeni aktuatori koji doziraju različite kemikalije, a to su natrijev bikarbonat, klor i natrijev hidrogen sulfata. Senzor za mjerenje pH vrijednosti šalje signal PLC-u i ako je pH vrijednost manja od 7,2 tada se aktivira aktuator koji dozira natrijev bikarbonat kako bi povećao pH vrijednost do željene razine. Ako se pH vrijednost poveća iznad 7,4 tada se može dodati klor kako bi se pH vrijednost smanjila, no ako je razina klora zadovoljavajuća tada se dodaje natrijev hidrogen sulfata koji spušta pH vrijednost. Senzor koji mjeri ORP kao izlaz ima naponski signal koji šalje do PLC-a, amplituda napona ne smije pasti ispod 650mV, odnosno kada napon padne na tu vrijednost, aktivira se aktuator za doziranje klora te se vrijednost ORP-a povećava do željene veličine od 800mV [1-3].

U svrhe ovog rada smatrat će se da je razine vode konstanta, i da pumpa ima konstantan protok, odnosno da je cirkulacija vode konstanta.

3.1 Komponente sustava za održavanje kvalitete vode u bazenu

U odabiru opreme od značaja će biti matematički modeli koji nam dosta dobro opisuju brzinu promjene stanja baze prema čemu se može odabirati oprema. Od opreme odabiru se senzori, te filter.

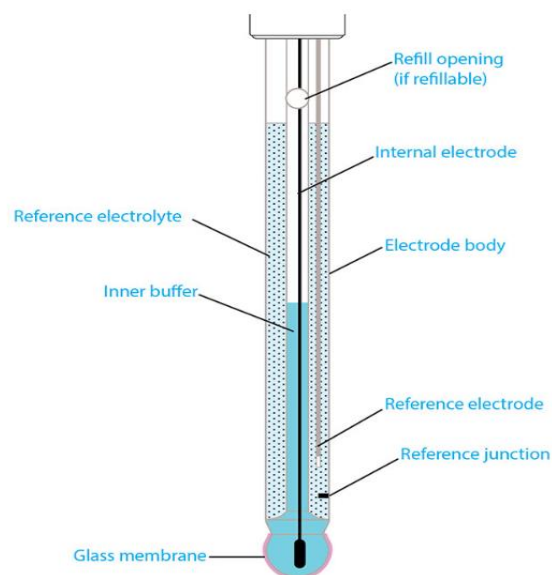
3.1.1 Izbor senzora za pH vrijednost

Postoje tri osnovna načina za mjerenje pH razine u vodi, a to su vizualni, fotometrijski, potenciometrijski. Vizijski i fotometrijski se temelje na promjeni boje specifičnih pigmenata. Vizijske metode koriste trakice za određivanje pH vrijednosti, dok fotometrijski rade na način da sijaju svjetlo kroz uzorak i mjere koliko se svjetlosti apsorbira. Primjena ovakvih senzora je limitirajuća jer se trakice mogu oštetiti, a voda može biti mutna što će dovesti do loših mjerenja. Potenciometrijski senzori nemaju nedostatke koje imaju vizijski senzori. Stoga se za potrebe ovoga rada izabire potenciometrijski senzor.

3.1.1.1 Princip rada potenciometrijskog senzora

Staklena pH sonda je primjer ion selektivne elektrode (eng. Ion selective electrode). Ovaj mjerni sustav se sastoji od ion elektivne elektrode koja reagira na određeni tip iona, u ovom slučaju ion vodika, i referentne elektrode koje su zajedno uronjene u uzorak koji se mjeri. ISE vodika osigurava elektrokemijski potencijal na koji utječe aktivnost vodikovih iona u otopini. Međutim, referentna elektroda je namijenjena izgradnji elektrokemijskog potencijala koji ne

ovisi o sastavu uzorka. Razlika između ovih potencijala, napon(mV) prikazan na pH metru, određuje pH vrijednost na temelju Nernstove jednadžbe. [6]



Slika 7: Shematski prikaz pH senzora [5]

3.1.1.2 ZW03 pH senzor

Izbor pada na senzor tvrtke Winsen koja u ponudi ima senzor za razinu pH vrijednost. Senzor ima odlične karakteristike, nisku potrošnju energije, visoku preciznost, linearni izlaz te jednostavnu kalibraciju i odličnu stabilnost.



Slika 8: Senzor ZW03 [6]

Items	Parameter	Items	Parameter
Working voltage	12V(DC)	Measure range	0-14
Consumption	<25mW	Resolution ratio	0.02pH
Temperature range	0-50°C	Size	40×25mm
Output mode	RS485 (5V)	Response time	≤180 s
Output linearity	Linear	Output linearity	Linear
Response time	≤180S	Service life	3year
Detection Temperature range	0-50°C	Working current	<5mA

Slika 9: Tehničke specifikacije senzora [6]

3.1.2 Izbor senzora za mjerenje količine klora

Kod mjerenja klora postoje više stvari koje se mogu mjeriti, kao što su slobodni klor, klorov dioksid, ukupni klor, slobodni brom. Mjerenje svake od tih stvari ima svoju važnost u različitim primjenama, za ovu primjenu mjerenje klora u bazenu najbitnija je mjera slobodnog klora jer nam ukazuje na sposobnost klora da razgrađuje bakterije i viruse.

3.1.2.1 Princip rada senzora za mjerenje klora

Objekte tvori, hipoklorovita kiselina (HOCl) i hipokloritni ion (OCl⁻), difundiraju kroz membranu između katode i uzorka otopine, iako su koeficijenti difuzije za svaku od njih različiti. Na primijenjenom potencijalu, samo se hipoklorovita kiselina elektrokemijski reducira. HOCl se reducira u kloridni ion na zlatnoj katodi. Istovremeno, srebrna anoda se oksidira i formira srebrni klorid (AgCl). Kada se koncentracija HOCl na katodi drastično smanji zbog elektrokemijske redukcije, hipokloritni ion će se, do određene mjere, transformirati u hipoklorovitu kiselinu putem prijenosa protona. Oslobođanje elektrona na katodi i prihvatanje na anodi stvara protok struje koja, pod konstantnim uvjetima, proporcionalna je koncentraciji slobodnog klora u mediju izvan senzora. Rezultirajući niskonaponski izlaz struje zatim se kondicionira na 4-20 mA struju pomoću ugrađenih elektroničkih krugova senzora. [8]

3.1.2.2 Memosens CCS51E

Izbor senzora za slobodni klor pada na Memosens CCS51E zbog svoje pouzdanosti, preciznosti te jednostavnosti za korištenje. Njegovo vrlo kratko vrijeme odziva omogućuje precizan uvid u proces i omogućuje brze reakcije. Ima širok raspon mjerenja do čak 200mg/l.



Slika 10: memosens CCS51E [8]

Measuring principle	Free chlorine
Application	Ensuring reliable disinfection in drinking water Process water Dosing disinfectant efficiently in pool water Detect the absence or presence of free chlorine in Utilities Guarantee food safety and provide hygienic packaging and bottling
Characteristic	Amperometric measurement of dissolved free chlorine
Measurement range	Trace: 0 to 5 mg/l HOCl Standard: 0 to 20 mg/l HOCl High: 0 to 200 mg/l HOCl
Measuring method	Closed, membrane covered measuring cell Reduction of free chlorine at the cathode
Design	Closed amperometric 2-electrode measuring cell with PVDF membrane
Material	Sensor shaft: POM Membrane: PVDF Membrane cap: PVDF Sealing ring: FKM
Dimension	Diameter: 25 mm (0.98 inch) Length: 161 mm (6.34 inch)
Process temperature	0 to 55 °C (32 to 130 °F), non-freezing

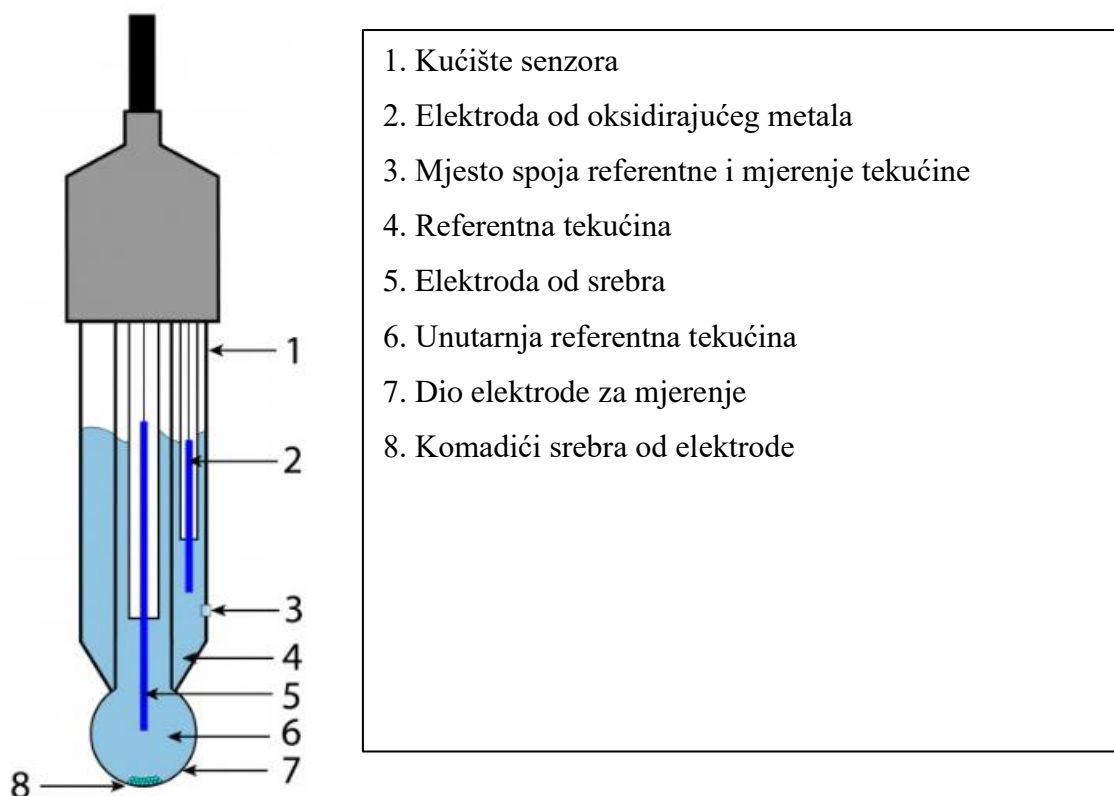
Slika 11: Tehničke specifikacije za Memosens CCS51E [9]

3.1.3 Izbor senzora za mjerenje ORP

Mjerenje ORP ima veliku važnost u održavanju vode u bazenima čistom, sam senzor je slične izvedbe kao i senzor za mjerenje klora.

3.1.3.1 Princip rada ORP senzora

Senzor za mjerenje ORP-a sastoji se od sonde, koja je uronjena u vodu koja se želi testirati. Sonda se sastoji od dvije elektrode, od kojih je jedna napravljena od oksidirajućeg materijala (najčešće platina ili zlato), a druga od srebra ili bakra. Elektrode su odvojene membranom, koja selektivno dopušta ionima da prolaze. Kada se sonda uroni u vodu, oksidirajuća elektroda dobiva elektrone dok ih druga elektroda gubi. Ta razmjena elektrona stvara napon koji se mjeri, te se iz toga može odrediti potencijal da oksidira druge čestice. [10]



Slika 12: Shematski prikaz ORP senzora [10]

3.1.3.2 Izbor senzora

Izabran je senzor MW-ORP101 zbog svoje pouzdanosti, visoke preciznosti, brzog odziva. Senzor ima odličnu razlučivost od 1mV te opseg mjerenja od -2000mV do 2000mV što je za potrebe ovog rada i više nego dovoljno.[11]



Slika 13: Winson MW-ORP101 [10]

Items	Parameter
Detection object	Solution
Measure Range	-2000 mV ~ + 2000
Resolution	1 mV
Response time	≤120 s
Material	ABS
Working temperature	0°C ~ 50°C
Service life	1year

Slika 14: Tehničke specifikacije za Winson MW-ORP101 [11]

3.1.4 Izbor filtera

Filter za vodu u bazenu je jedna od najvažnijih komponenti za održavanje vode čistom. Služi kako bi se razna prljavština odstranila iz vode. Rade na način da pumpa vodu iz bazena cijelo vrijeme cirkulira i sva voda prolazi kroz filter gdje se odstranjuje razna prljavština. Postoje tri osnovne vrste filtera: pješčani, s uloškom i dijatomejski. Svaki ima svoje prednosti i nedostatke, a ovisno o primjeni odabire se i sam filter. [12]

3.1.4.1 Pješčani filter

Pješčani filtri se najčešće koriste u javnim bazenima. Imaju dobra svojstva filtracije i financijski su prihvatljivi. Mogu filtrirati čestice veličine od 20 do 40 mikrona, a potrebno ih je mijenjati svakih 5-7 godina.



Slika 15: Pješčani filter [12]

Prednosti	Nedostaci
Najjeftinija opcija	Nije najučinkovitija opcija
Najmanja potreba za održavanjem	Pretjerano ispiranje može gubiti vode
Jednostavna upotreba	Ispiranje može utjecati na kemikalije u bazenu

3.1.4.2 Filter s uloškom

Filteri s uloškom dolaze u raznim veličinama i oblicima. Većina ih je napravljeno od poliestera i polipropilena i sadrže nabore ili rešetke koje odstranjuju prljavštinu. Ovakav tip filtera može odstraniti male čestice od čak 15 mikrona. Imaju dug životni vijek, no potrebno ih je češće čistiti ovisno o količini prljavštine u bazenu.



Slika 16: Filter s uloškom [12]

Prednosti	Nedostaci
Jednostavno čišćenje i zamjena	Ulošci su skuplji
Učinkovitiji za filtraciju	Potrebno je redovno čišćenje

3.1.4.3 Dijatomejski filter

Najčešće se koriste kod velikih bazena koji se nalaze na područjima gdje ima više prljavštine, kao što su mjesta s puno drveća, životinja i sl. Ovakav tim filtera ima odličnu sposobnost filtriranja čak i najmanjih čestica (5 mikrona).



Slika 17: Dijatomejski filter [12]

Prednosti	Nedostaci
Najučinkovitija filtracija	Najskuplja opcija
Ispiranje je potrebno svakih par mjeseci	Više održavanja
Mogu trajati godinama uz pravilno održavanja	

Obzirom na opcije filtera koje se nude na tržištu te njihove prednosti i nedostatke, u svrhu ovog rada odabrat će se filter s ulošcima zbog njegove jednostavnosti za upotrebu, a opet dovoljno dobrih svojstava filtracije.

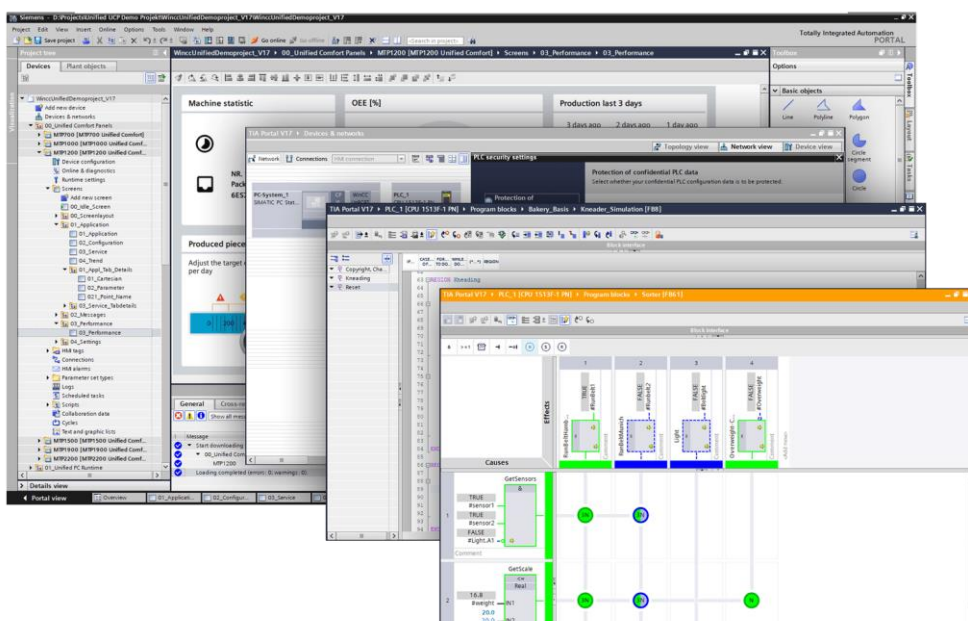
3.2 Vođenje sustava pomoću PLC-a

Cjelokupni sustav se implementira preko PLC-a (eng. programmable logic controller), to je industrijsko računalo koje je iznimno robusno i prilagođeno korištenju u procesima proizvodnje, od montažnih traka, do upravljanja strojevima, robotima i sl. Za ovaj sustav regulacije izabran je PLC Siemens S7-1500 koji je jedan od najboljih PLC-ova na tržištu s velikim izborom procesa i modularnošću, na njega se mogu nadodavati razni moduli za dodatne ulaze/izlaze, signalni moduli... Za ovaj sustav od modula će se koristiti modul za analogne ulaze, na koji će biti spojeni senzori.



Slika 18: PLC S7-1500 [13]

Za programski dio koristit će se Siemensov software TIA (eng. Totally Integrated Automation) Portal koji omogućuje korisniku dizajn, programiranje, testiranje i održavanje automatiziranih sustava. Mogu se programirati samo PLC-ovi, ali i HMI (eng. Human Macnihne Interface), pogonske sisteme itd. [13]



Slika 19: TIA Portal [13]

3.2.1 Tablica adresa

Tablica adresa u TIA Portalu pokazuje korištene adrese na PLC-u. Tu se nalaze analogni i digitalni ulazi i izlazi, te adrese memorija koje se koriste. Dani su i komentari kod svake adrese koji govore za što se koja adresa koristi.

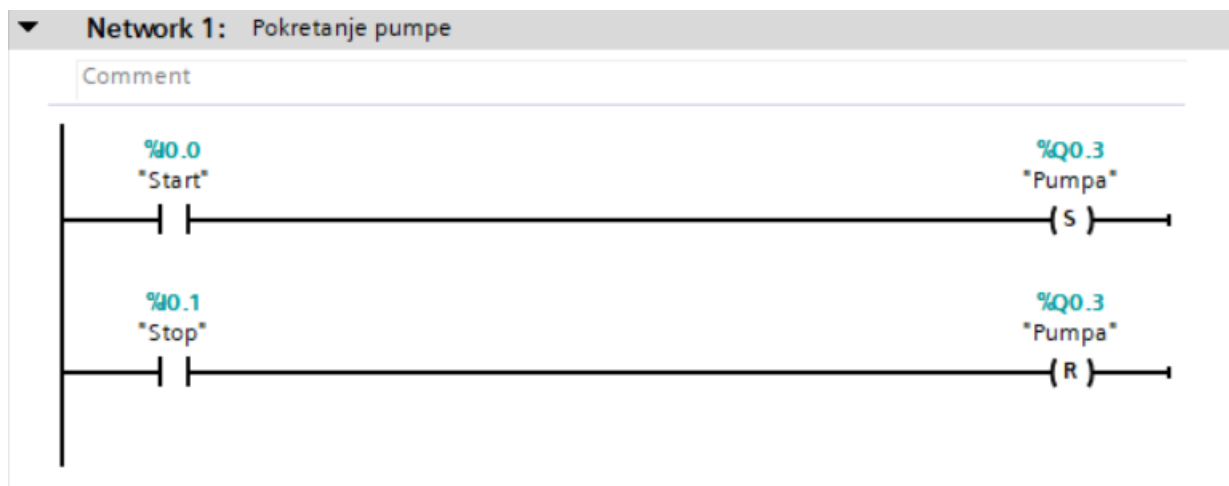
PLC tags										
	Name	Tag table	Data type	Address	Retain	Acces...	Writa...	Visibl...	Supervision	Comment
1	Stop	Default tag table	Bool	%I0.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Pokretanje sustava
2	Start	Default tag table	Bool	%I0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Zaustavljanje sustava
3	pH Senzor	Default tag table	Int	%IW0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		Vrijednost sa pH senzora
4	NormpH	Default tag table	Real	%MD0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
5	pH Vrijednost	Default tag table	Real	%MD4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Stvarna pH vrijednost
6	Natrijev Bisulfat	Default tag table	Bool	%Q0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Ventil za dodavanje natrijevog bisulfata
7	Klor	Default tag table	Bool	%Q0.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Ventil za dodavanje klora
8	Klor Sensor	Default tag table	Int	%IW2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Vrijednos sa senzora klora
9	ORP Senzor	Default tag table	Int	%IW4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		vrijednost sa ORP senzora
10	NormKlor	Default tag table	Real	%MD8	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
11	Vrijednost Klora	Default tag table	Real	%MD12	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Stvarna vrijednost klora
12	NormORP	Default tag table	Real	%MD16	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
13	Vrijednost ORP	Default tag table	Real	%MD20	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Stvarna vrijednost ORP
14	MemorijaKlora	Default tag table	Bool	%M17.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
15	Natrijev Bikarbonat	Default tag table	Bool	%Q0.2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Ventil za dodavanje natrijevog bikarboanta
16	Pumpa	Default tag table	Bool	%Q0.3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Pokretanje pumpe
17	SenzorKolklor	Default tag table	Int	%IW8	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Senzor količine klora u spremniku
18	NormKolklor	Default tag table	Real	%MD26	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
19	Kolklor	Default tag table	Real	%MD30	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Količina klora u spremniku u litrama
20	SenzorKolBisulfata	Default tag table	Int	%IW10	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Senzor količine natrijevog bisulfata
21	NormKolBisulfata	Default tag table	Real	%MD34	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
22	KolBisulfata	Default tag table	Real	%MD38	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Količina natrijevog bisulfata u litrama
23	SenzorKolBikarbonata	Default tag table	Int	%IW12	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Senzor količine natrijevog bikarbonata
24	NormKolBikarbonata	Default tag table	Real	%MD42	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
25	KolBikarbonata	Default tag table	Real	%MD46	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Količina natrijevog bikarbonata u litrama
26	AlarmKlor	Default tag table	Bool	%Q0.5	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Lampica za premalu količinu klora u spre...
27	AlarmBisulfat	Default tag table	Bool	%Q0.6	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Lampica za premalu količinu natrijevo bisu...
28	AlarmBikarbonat	Default tag table	Bool	%Q0.7	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Lampica za premalu količinu natrijevo bik...

Slika 20: Tablica adresa

3.2.2 Ladder dijagram

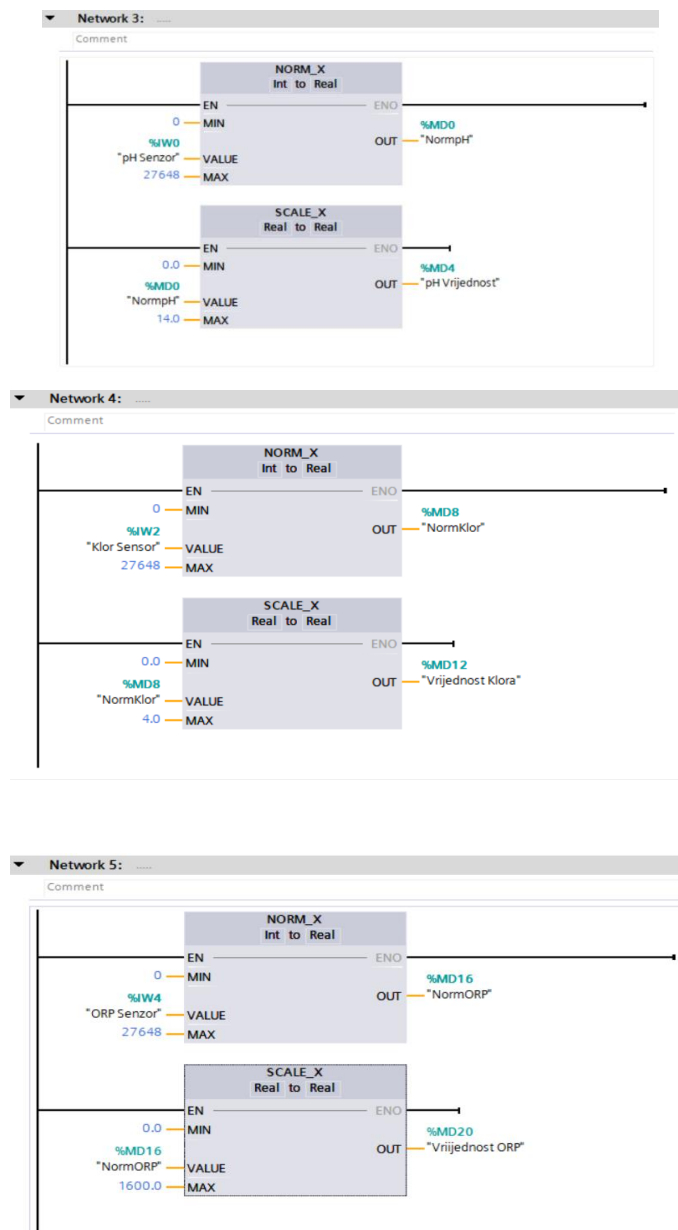
Ladder dijagram jedan je od načina programiranja PLC-ova. Njegova je prednost grafički prikaz koda koji olakšava programiranje a i samo razumijevanje cijelog koda.

Na tipkalo „Start“ pokreće se cijeli sustav, pokreće se pumpa koja cirkulira vodu kroz filter i spremnik u kojem se nalaze senzori. Tipkalo „Stop“ zaustavlja se sustav.



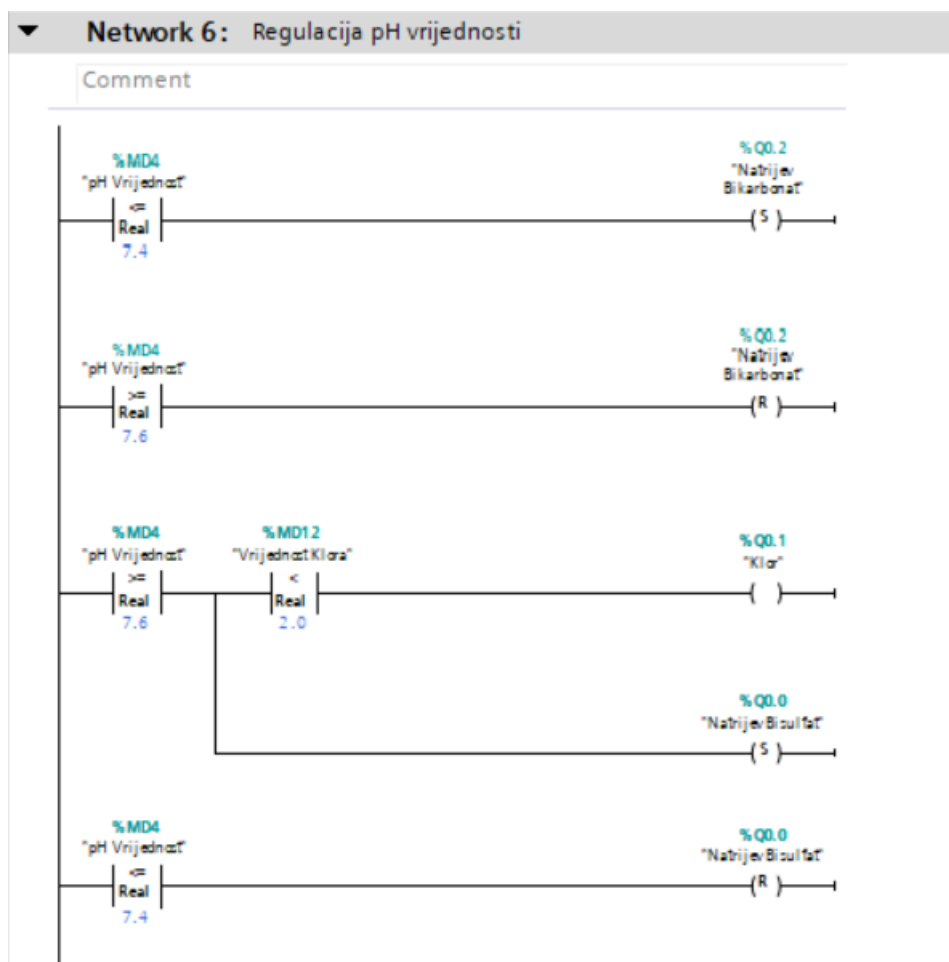
Slika 21: Start/Stop

Na ulaz „value“ bloka NORM_X dolazi vrijednost sa senzora koja je između 0 i 27648 i to je Int tip varijable koji se prebacuje u Real varijablu na izlazu bloka NORM_X koja je zapravo postotna vrijednost ulaza tj., ako je ulaz 0 tada je izlaz na 0%, a ako je 27648 tada je vrijednost 100%. Ta vrijednost je ulaz u blok SCALE_X koji ovisno o vrijednosti sa izlaza bloka NORM_X daje stvarnu vrijednost.



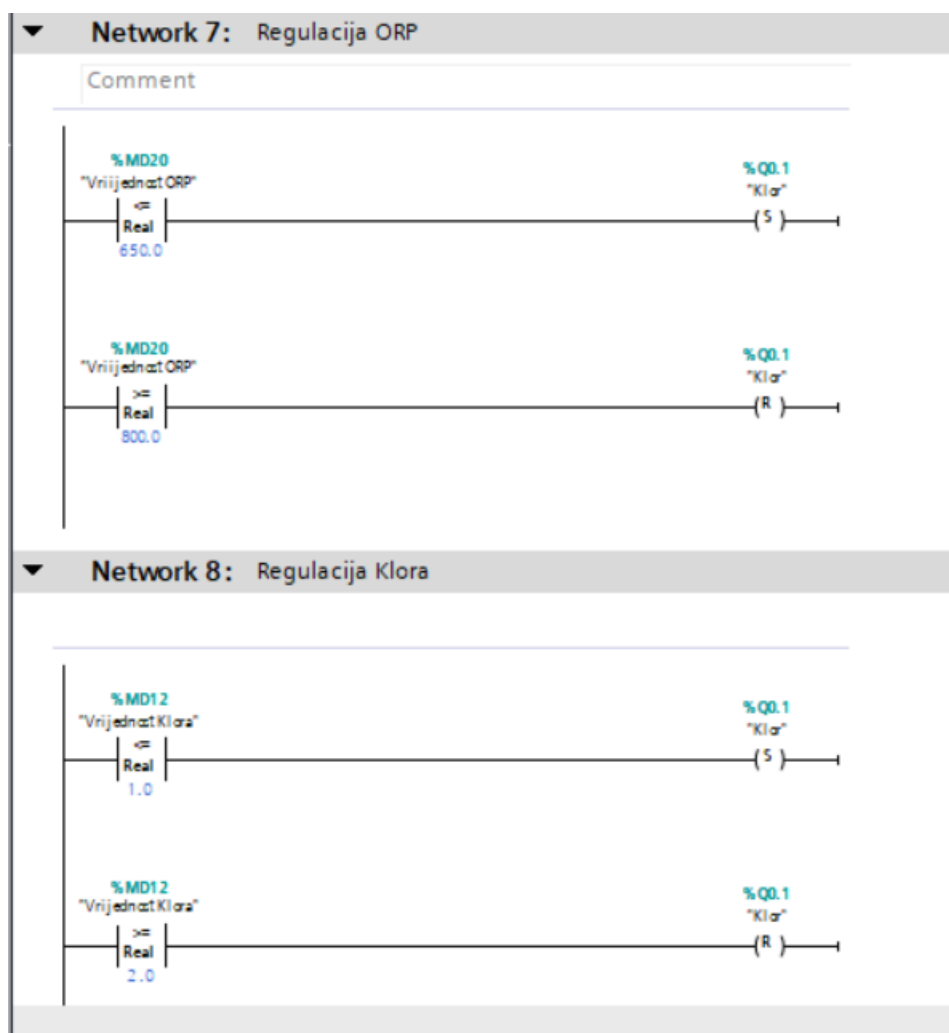
Slika 22: Inicijalizacija analognih senzora

Slika 23 prikazuje dio ladder dijagrama koji regulira pH vrijednost uspoređujući stvarne vrijednosti sa željenim vrijednostima i ovisno o tome aktivira aktuator koji doziraju kemikalije.



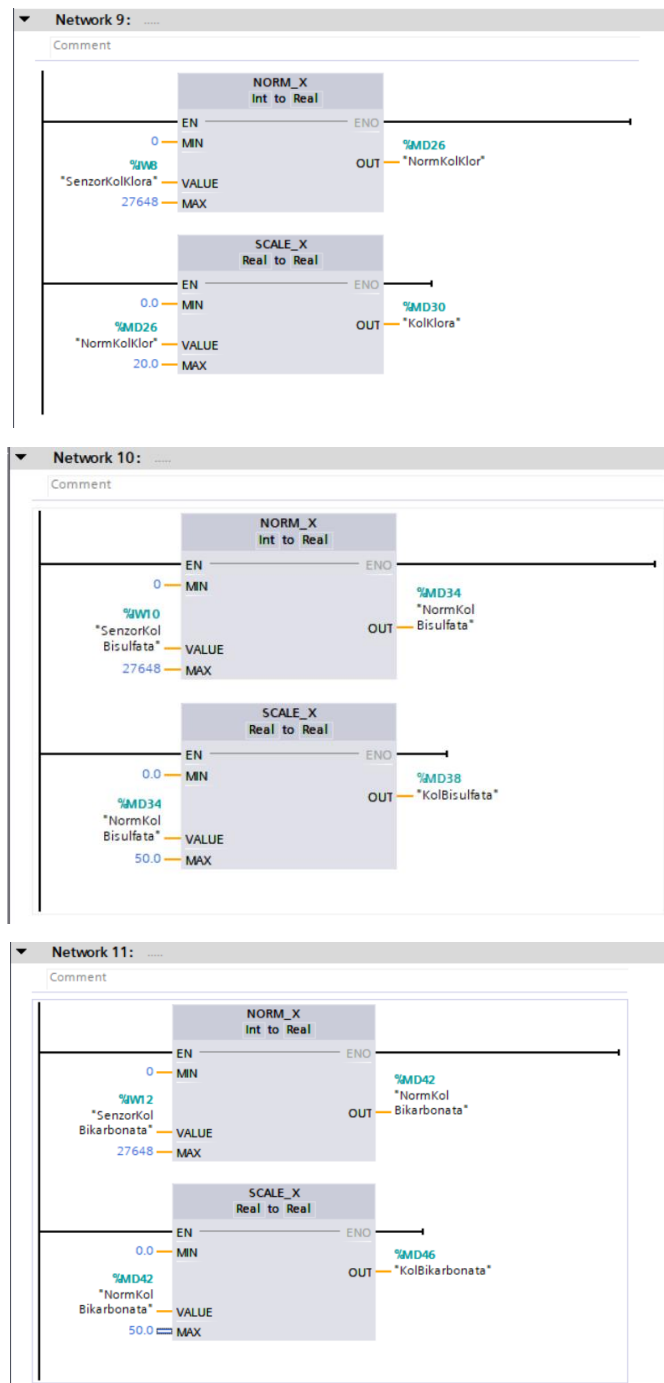
Slika 23: Regulacija pH vrijednosti

Stvarne vrijednosti se uspoređuju sa pragovima tolerancije u bazenu, te se adekvatno tome doziraju kemikalije



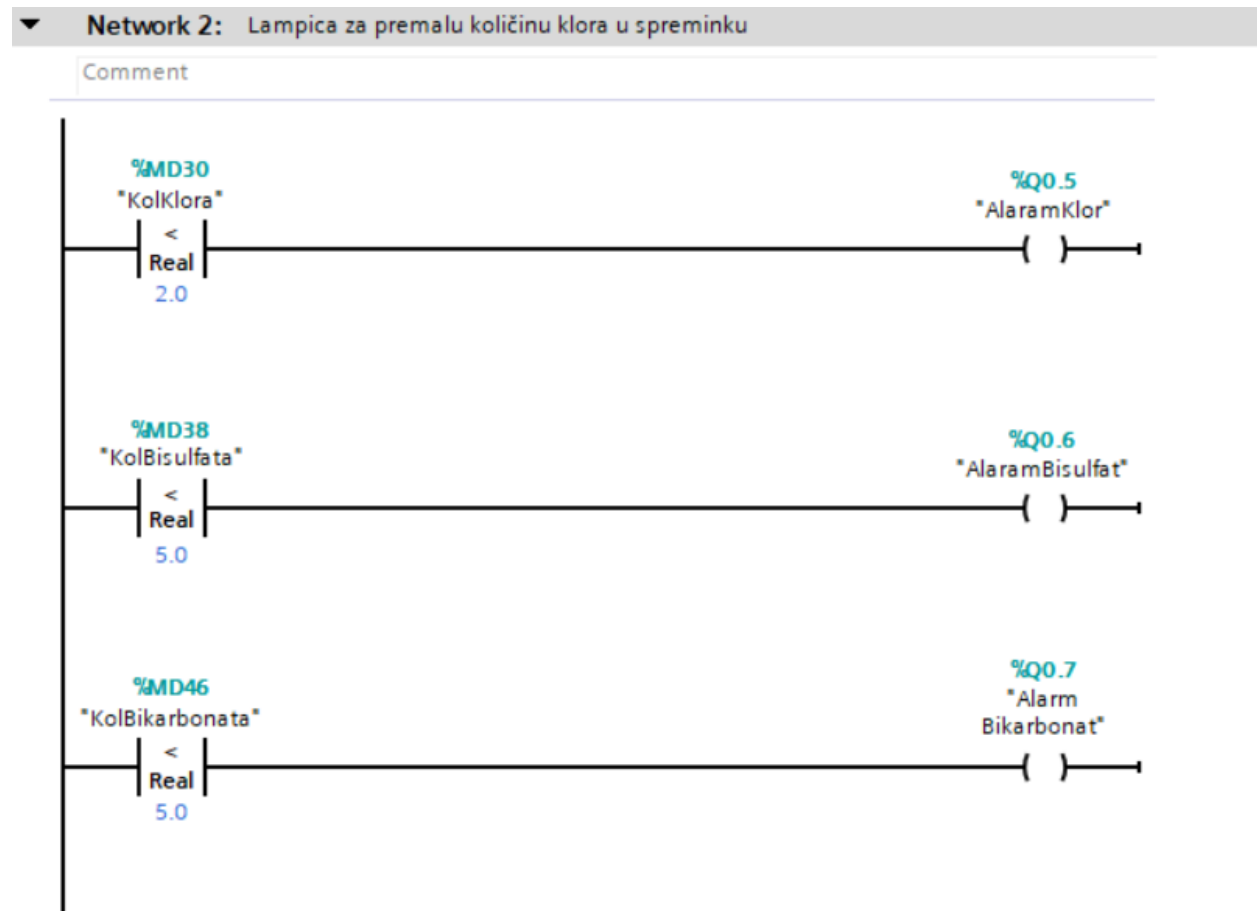
Slika 24: Regulacija ORP i Klora

Na slici 25.prikazan je dio ladder dijagrama koji služi za inicijalizaciju senzora količine kemikalije. Svaki spremnik na sebi ima senzor za masu koji nam služi kako bi mogli pravovremeno dodavati kemikalije.



Slika 25: Inicijalizacija senzora za količine kemikalija

Ukoliko vrijednost klora padne ispod 2 litre tada se uključuje lampica koja signalizira prenisku vrijednost, isto je napravljeno i za druge kemikalije.

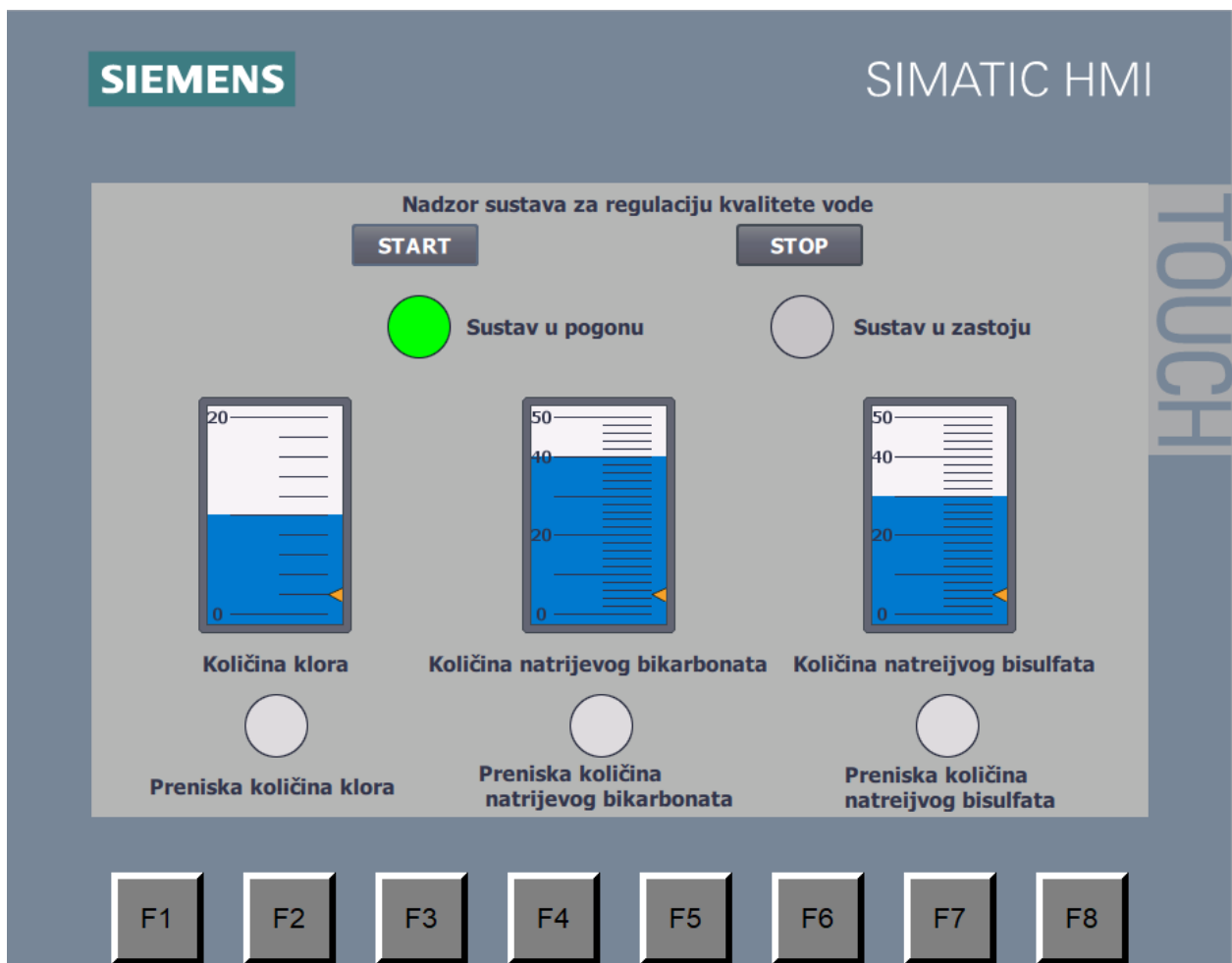


Slika 26: Alarmi za male količine kemikalija u spremnicima

3.2.3 HMI

HMI (eng. Human-Machine interface) je sustav koji omogućuje interakciju čovjeka i stroja. Na njemu može biti prikazan cijeli sustav ili samo neki njegov dio. Može se upravljati sustavom i nadgledati ga.

Na slici 27 prikazan je HMI za sustav regulacije vode u bazenu koji se sastoji od tipkala start i stop za pokretanje i zaustavljanje sustava, te spremnika na kojima se vidi točna količina kemikalija u njima i lampica koje služe kao alarm ukoliko količina kemikalija padne ispod određene vrijednosti.



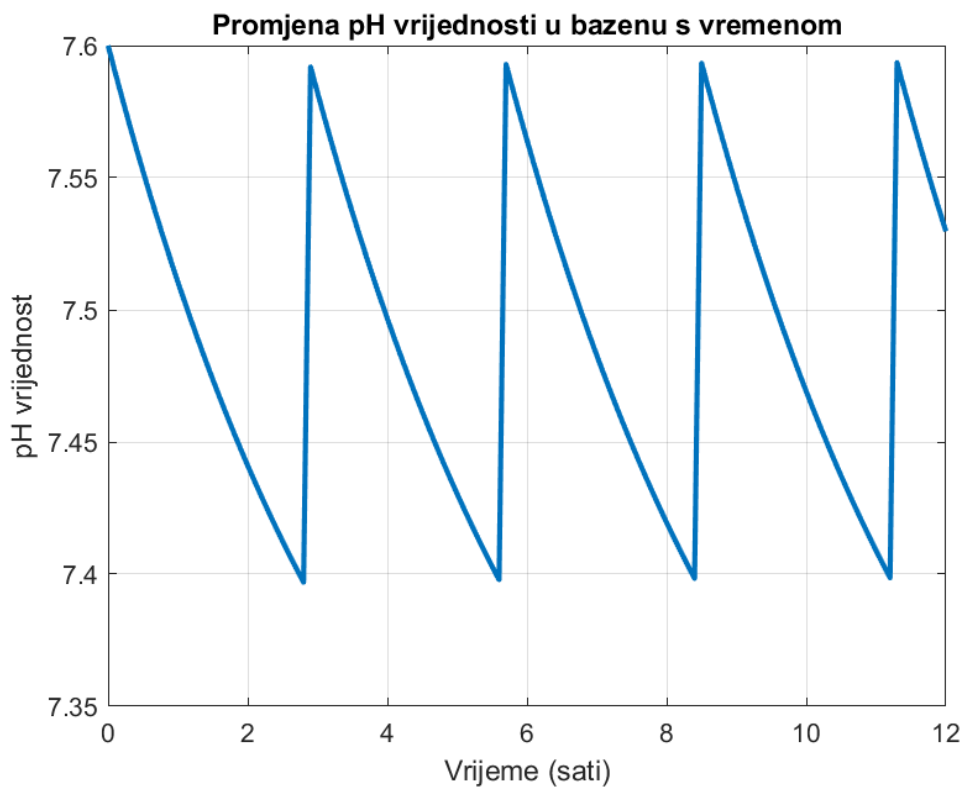
Slika 27: HMI

4. SIMULACIJE RADA SUSTAVA

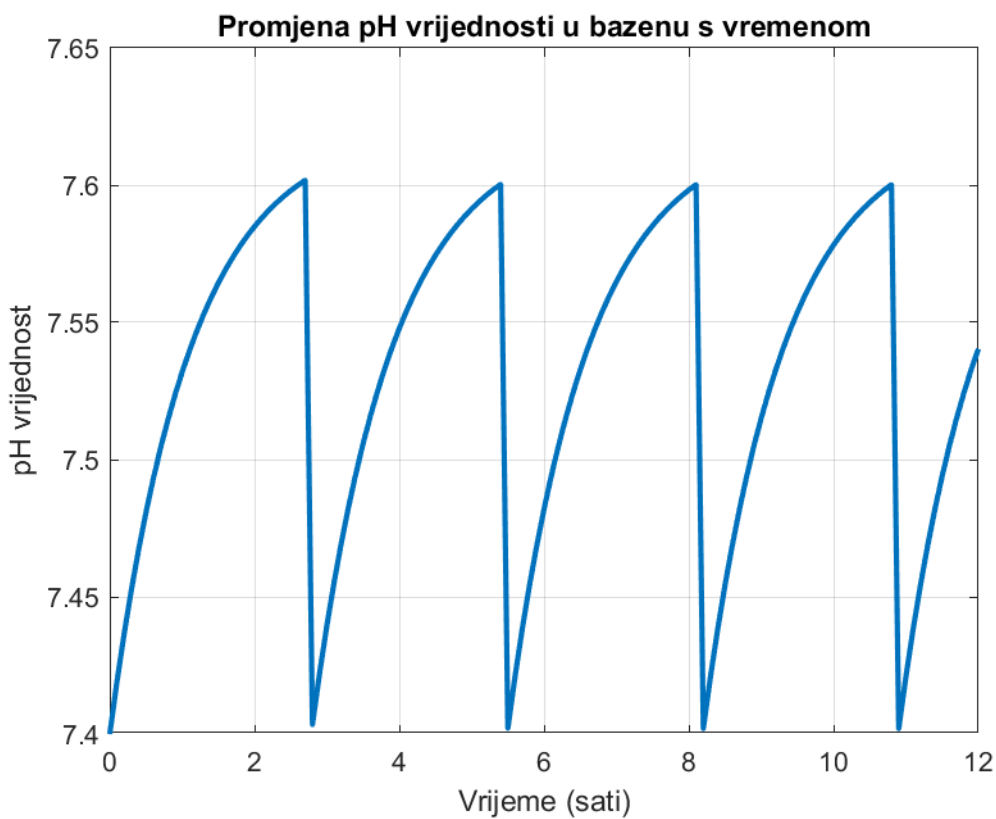
Simulacije su odličan način da se prikaže kako će sustav funkcionirati prije nego se osposobi stvarni sustav, što nam omogućuje detaljnu razradu i podešavanje svih parametara na jednostavniji i brži način. Naravno, simulacije nikada ne mogu sa sto postotnom preciznošću predvidjeti kako će se neki stvarni sustav ponašati, ali u ovoj primjeni gdje nam preciznost u brzina odzivna nisu prebitne simulacije su odličan alat. U ovom poglavlju simulirana je regulacija pH vrijednosti, klora, te ORP-a kroz 24 sata. Sve su simulacije izvedene u programu Matlab.

4.1 Simulacija promjene pH razine

Simulacije promjene pH vrijednosti se temelje na gore navedenom matematičkom modelu. Slika 28 prikazuje graf promjene pH vrijednosti kroz noć (12h). Početna vrijednost kreće od 7,6 što je unutar praga za dopuštenu pH vrijednost, nakon tri sata vrijednost pada na donju granicu od 7,4 zbog čega se aktivira pumpa koja dodaje natrijev hidrogen sulfata kako bi se podigla pH vrijednost. Noću, kada nema kupaća, prskalica i sl. stvari koje utječu na promjenu CO₂ u vodi, tada se pH smanjuje zbog klora i organskih tvari u vodi. Na slici 29 prikazan je isti graf ali za dnevne sate, odnosno kada se koeficijent promjene pH vrijednosti zbog utjecaja CO₂ povećao jer postoje kupaći koji prskaju vodom, prskalice zbog kojih se smanjuje CO₂, a onda raste i pH vrijednost. U trenutku kada pH vrijednost dosegne razinu od 7,6 tada se dodaje natrijev bikarbonat kako bi se pH vrijednost snizila na željenu od 7,4.



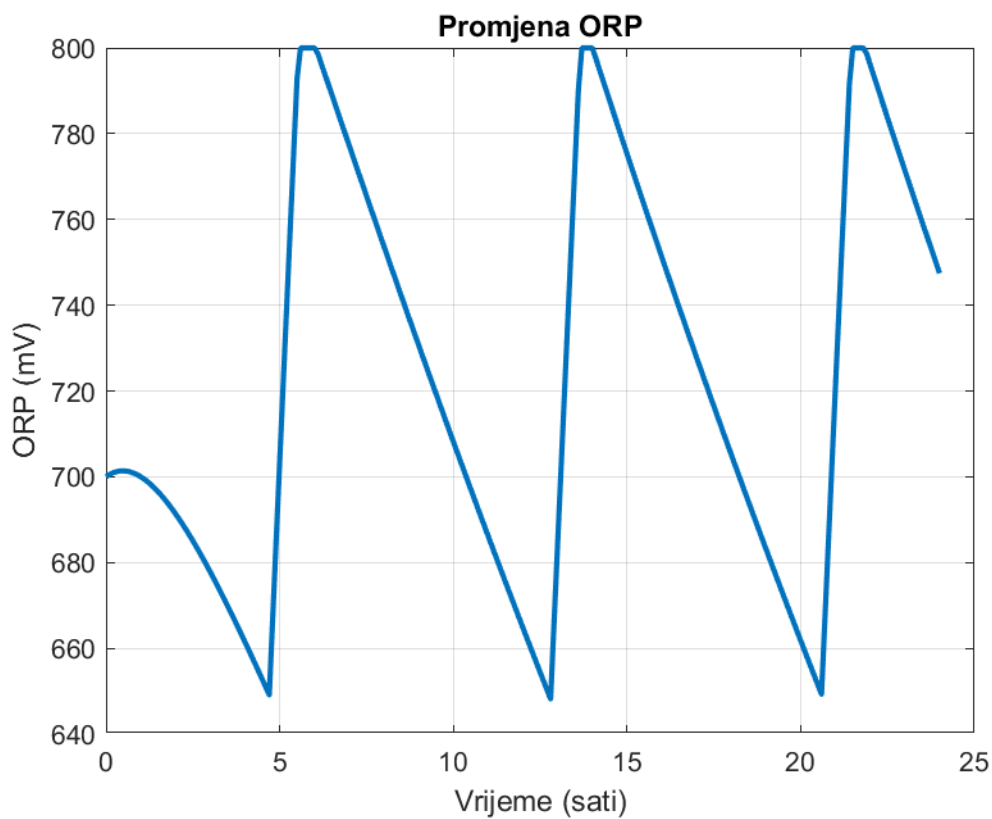
Slika 28: Regulacija pH vrijednosti kroz 12h(Noć)



Slika 29: Regulacija pH vrijednosti kroz 12h(Dan)

4.2 Simulacija promjene ORP-a

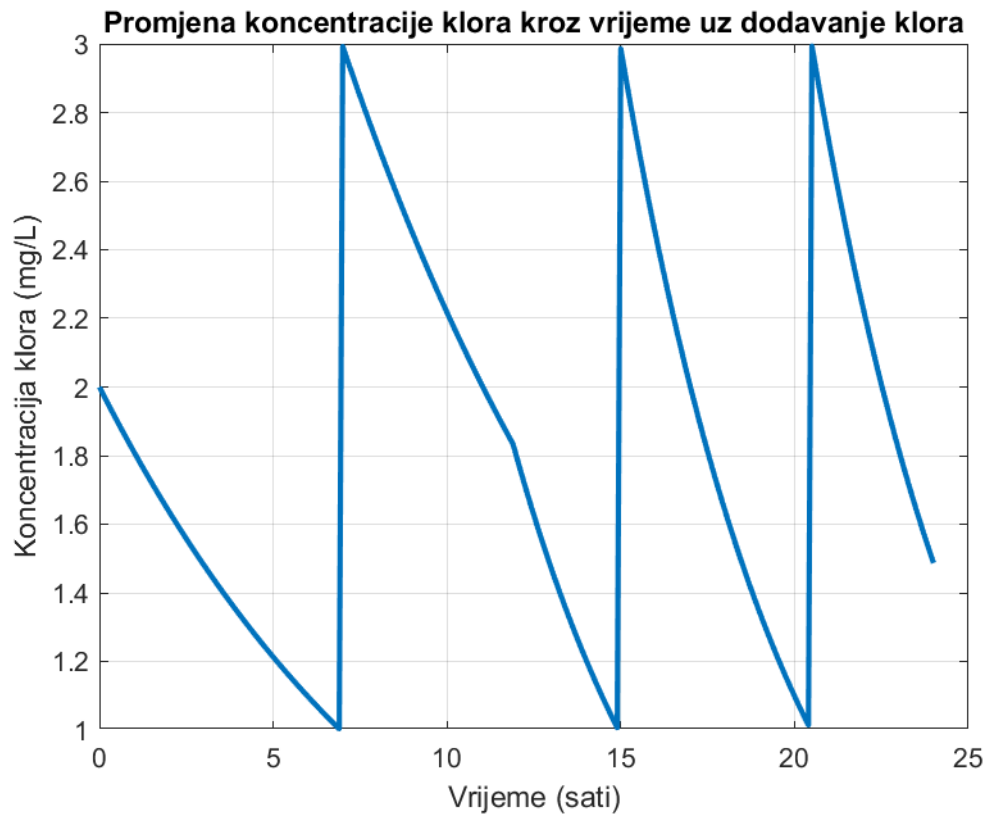
Na grafu prikazanom slikom 30 vidi se promjena ORP-a kroz 24h. Za idealne uvjete u bazenu vrijednost bi trebala biti između 650 mV i 800 mV što se i postiglo dodavanjem klora u trenutcima kada vrijednost dođe do 650 mV.



Slika 30: Promjena ORP kroz 24h

4.3 Simulacija promjene klora

Slika 30 prikazuje kako se klor mijenja kroz dan uz njegovo dodavanje. Simulacija je rađena tako da je graf podijeljen na 12 sati gdje se bazen koristi i 12 sati gdje je bazen prazan, a ovisno onda o tome se mijenja brzina promjene klora u vodi. U prvih 12 sati klor se sporije raspada jer nema ljudi koji koriste bazen, stoga je i konstanta raspada klora manja, a drugih 12 sati prikazuje brži raspad klora jer je konstanta veća zbog većeg broja ljudi u vodi.



Slika 31: Promjena klora kroz 24h

4.4 Analiza simulacija i moguća poboljšanja

Na osnovu izvršenih simulacija može se jasno vidjeti na koji način se ponašaju kemikalije u samom bazenu te koliko je često i koliku količinu dodavati kako bi razina ostala u optimalnoj razini. Kod regulacije pH vrijednosti za slučaj noćnog rada odnosno bez kupaca u bazenu vidi se potreba za dodavanjem kemikalija otprilike svakih 3 sata (slika 28.). Da bi se razina pH vrijednosti povećala za 0.1 potrebno je otprilike 75 grama natrijevog bikarbonata na 10 m^3 vode. Time možemo odrediti potrebnu količinu za održavanje pH vrijednosti ovisno o veličini bazena. Za slučaj kada je dan, tada je potrebno spuštati pH vrijednost što se može ili dodavanjem klora ili dodavanjem natrijevog hidrogen sulfata. Da bi se razina pH vrijednosti snizila za 0.1 potrebno je otprilike 100 grama natrijevog hidrogen sulfat na 10 m^3 vode[14]. Za regulaciju ORP-a u vodi, koristi se klor, kako vi se vrijednost ORP-a povećala za 20 mV potrebno je 10 grama klora na 10 m^3 vode. Za količinu slobodnog klora u vodi idealno je da se nalazi između 1 i 3 mg/l, kad vrijednost padne na 1 mg/l potrebno je dodati dovoljnu količinu da se poveća za 2 mg/l, što znaci 20 grama na 10 m^3 vode[15].

Moguća poboljšanja ovog sustava mogla bi se realizirati mjerenjem još više različitih tvari kao što su tvrdoća vode, metali itd. Njihov utjecaj nije značajan kao utjecaj kemikalija obrađenih u ovom radu ali imaju svoj utjecaj. Također bi se mogli koristiti složeniji regulatori s obzirom na to da nakon dodavanja kemikalija njihova promjena na samom senzoru nije trenutna, stoga u stvarnom svijetu koristeći predloženi program dešavalo bi se da postoji određen prebačaj preko željene vrijednosti što bi se regulatorom moglo ukloniti. Time bi sustav bio složeniji i bilo bi potrebno više vremena dok se parametri regulatora ne podese na optimalne vrijednosti.

5. ZAKLJUČAK

Održavanje kvalitete vode u bazenu ključno je za sigurnost svih korisnika, ali i opreme samog bazena. U ovom završnom radu analizirane su metode i tehnologije kojima se održava optimalna kvaliteta vode, to uključuje kemijske tretmane, filtere, kontrolu pH vrijednosti. Svrha svih tih metoda je smanjenje prisutnosti patogenih mikroorganizama, uklanjanje organskih tvari te održavanje vode ugodnom za korisnike. Zatim je napravljen računalni model narušavanja kvalitete vode bazena te je na temelju toga predložen sustav za automatsko održavanje kvalitete vode u bazenu. Provedene su računalne simulacije rada predloženog sustava te se na temelju rezultata može zaključiti da bi takav sustav adekvatno mogao automatski održavati kvalitetu vode u bazenu.

6. LITERATURA

- [1] Water Quality Standards <https://zealux.com/water-quality-standards-for-public-pools/> (28.8.2024.)
- [2] A. F. Hofmann, F. J. R. Meysman, K. Soetaert, and J. J. Middelburg : A step-by-step procedure for pH model construction in aquatic systems
- [3] Ababu T. Tiruneh ,1Tesfamariam Y. Debessai,2 Gabriel C. Bwembya,2 and Stanley J. Nkambule1: A Mathematical Model for Variable Chlorine Decay Rates in Water Distribution Systems
- [4] Proper Chlorine Levels for Hralthy Pool <https://www.freedrinkingwater.com/blogs/water-health/proper-chlorine-levels-for-a-healthy-pool#:~:text=Regardless%20of%20how%20frequently%20or,red%20eyes%20and%20swimmers%20itch.> (28.8.2024.)
- [5]ORP<https://clearcomfort.com/your-guide-to-swimming-pool-oxidation-orp/#:~:text=If%20an%20ORP%20level%20is,into%20the%20800's%20not%20uncommon.> (28.8.2024.)
- [6] Measuring pH levels <https://hudsonrobotics.com/exploring-the-working-principles-of-ph-meters-how-do-they-measure-ph/#:~:text=The%20glass%20membrane%20in%20a,the%20pH%20of%20the%20solution.> (28.8.2024.)
- [7] pH Sensotr <https://www.winsen-sensor.com/product/zw03.html> (7.9.2024.)
- [8] Chlorine measurment <https://assets.omega.com/manuals/M4679.pdf> (7.9.2024.)
- [9] Chlorine Sensor <https://www.endress.com/en/field-instruments-overview/liquid-analysis-product-overview/free-chlorine-sensor-ccs51e?t.tabId=product-specification> (7.9.2024.)
- [10] Measuring ORP https://www.phidgets.com/docs/PH/ORP_Sensor_Guide (7.9.2024.)
- [11] ORP Sensor <https://www.winsen-sensor.com/product/mw-orp101.html?searchid=5282>
- [12] Pool Filters <https://www.seasonalworld.com/what-are-the-different-types-of-pool-filters-available/> (7.9.2024.)
- [13]Siemens<https://www.siemens.com/global/en/products/automation/systems/industrial/plc/simatic-s7-1500.html> (7.9.2024.)
- [14] regulacija pH <https://bazeni.hr/web-shop/kemijska-sredstva-za-bazene/ph-regulacija/ph-minus-granulat-5-kg/> (7.9.2024.)
- [15] regulacija klora <https://mysutro.com/blogs/water-treatment/how-much-liquid-chlorine-do-you-need-to-add-to-your-pool-what-is-it-and-how-do-you-add-it-to-your-> (7.9.2024.)

7. PRILOZI

I. Matlab kod

II. Računalni model

```
% Postavljanje početnih uvjeta
pocetni_pH = 7.6; % Početna pH vrijednost
t_end = 12; % Simulacija na 24 sata
dt = 0.1; % Vremenski korak (sati)
time = 0:dt:t_end;

% Parametri modela
kcl = 0.1; % Brzina promjene pH zbog klora
korg = 0.005; % Brzina promjene pH zbog organskih materijala
kco2 = 0.02; % Brzina porasta pH zbog gubitka CO2

klor = 1; % Dodavanje klora

pH = zeros(size(time));
pH(1) = pocetni_pH;
pH_cl2 = 0;

for i = 2:length(time)
    pH_org = -k_org * (pH(i-1) - 6.0);

    % Promjena pH zbog gubitka CO2
    pH_co2 = k_co2 * (9.0 - pH(i-1));

    if (pH(i-1) < 7.4)
        % Promjena pH zbog dodavanja klora
        pH_cl2 = k_cl2 * klor;
    else
        pH_cl2 = 0;
    end

    pH(i) = pH(i-1) + pH_org + pH_co2 + pH_cl2;
end

figure;
plot(time, pH, 'LineWidth', 2);
xlabel('Vrijeme (sati)');
ylabel('pH vrijednost');
title('Promjena pH vrijednosti u bazenu s vremenom');
grid on;
```

```

% Vrijednosti konstanti
kcl = 0.03;    % 1/h - raspad klora
krrORP = 400;    % mV/(mg/L) - konverzija klora u ORP
krr = 0.1;    % 1/h - raspad reduciranih tvari
kkk = 0.05;    % 1/h - konverzija klora u reakciji s reduciranim tvarima
kkkORP = 200;    % mV/(mg/L) - smanjenje ORP-a zbog reduciranih tvari

% Početne vrijednosti
C0 = 2.0;    % mg/L - početna koncentracija klora
R0 = 0.5;    % mg/L - početna koncentracija reduciranih tvari
t_max = 24;    % sati - vrijeme simulacije
dt = 0.1;    % vremenski korak (u satima)
dodavanje_klora = 0.05;    % mg/L - količina klora koja se dodaje kad ORP padne ispod 650 mV

t = 0:dt:t_max;

C = zeros(size(t));    % Inicijalizacija koncentracije klora
R = zeros(size(t));    % Inicijalizacija koncentracije reduciranih tvari
ORP1 = zeros(size(t));    % Inicijalizacija ORP-a

% Početne vrijednosti
C(1) = C0;
R(1) = R0;
ORP1(1) = 700;    % Početni vrijednost ORP

dodaj_klor = false;

for i = 2:length(t)
    C(i) = C(i-1) * exp(-kcl * dt);

    R(i) = R(i-1) * exp(-krr * dt) + (kkk/(krr - kcl)) * C0 * (exp(-kcl * dt) - exp(-krr * dt));

    % Dodavanje klora kad ORP padne ispod 650 mV
    if ORP1(i-1) < 650
        dodaj_klor = true;
    elseif ORP1(i-1) >= 800
        dodaj_klor = false;
    end

    if dodaj_klor
        C(i) = C(i) + dodavanje_klora;
    end

    ORP1(i) = krrORP * C(i) - kkkORP * R(i);

    % Ograničavanje ORP-a na maksimalnih 800 mV
    if ORP1(i) > 800
        ORP1(i) = 800;
    end
end

figure;
plot(t, ORP1, 'LineWidth', 2);
xlabel('Vrijeme (sati)');
ylabel('ORP (mV)');
title('Promjena ORP');
grid on;

```

```
% Parametri
k1 = 0.05;    % 1/h - konstanta raspada klora
C0 = 2.0;    % mg/L - početna koncentracija klora
t_max = 50;  % sati - vrijeme simulacije
dt = 0.1;    % vremenski korak (u satima)
dodavanje_klora = 2; % mg/L - količina dodanog klora kad koncentracija padne ispod 1 mg/L

t = 0:dt:t_max;

% Inicijalizacija koncentracije klora
C = zeros(size(t));
C(1) = C0;

for i = 2:length(t)
    C(i) = C(i-1) * exp(-k1 * dt); % Raspad klora
    if C(i) < 1.0
        C(i) = C(i) + dodavanje_klora; % Dodavanje klora ako padne ispod 1 mg/L
    end
    if C(i) > 3.0
        C(i) = 3.0; % Ograničavanje na maksimalnu koncentraciju od 3 mg/L
    end
end

figure;
plot(t, C, 'LineWidth', 2);
xlabel('Vrijeme (sati)');
ylabel('Koncentracija klora (mg/L)');
title('Promjena koncentracije klora kroz vrijeme uz dodavanje klora');
grid on
```