

SVEUČILIŠTE J.J. STROSSMAYER U OSIJEKU

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKH
TEHNOLOGIJA OSIJEK**

Sveučilišni studij

UGRADBENI RAČUNALNI SUSTAVI

Profesor/mentor: doc.dr.sc. Tomislav Keser

TEHNIČKA DOKUMENTACIJA PROJEKTA

SUSTAV ZA MJERENJE KVALITETE ZRAKA

Ilija Jazvić

Akademska godina 2023/2024

Osijek, 15. 6. 2024.

Sadržaj

1.	Uvod.....	2
1.1.	Zadatak i struktura rada	3
2.	Sustav za mjerenje kvalitete zraka	4
2.1.	Teorijski osvrt na sustav za mjerenje kvalitete zraka	4
2.2.	Prijedlog sklopovskog rješenja.....	6
2.3.	Prijedlog programskog rješenja.....	9
3.	Realizacija sustava za mjerenje kvalitete zraka	10
3.1.	Korištene komponente, alati i programska podrška	10
3.2.	Realizacija konstrukcijskog i sklopovskog rješenja	12
3.3.	Realizacija programskog rješenja.....	15
3.3.1.	Čitanje podataka s senzora DHT22	17
3.3.2.	Čitanje podataka s senzora MQ135.....	17
3.3.3.	Čitanje podataka s senzora BMP 180	19
4.	Testiranje i rezultati	21
4.1.	Metodologija testiranja	21
4.2.	Rezultati testiranja	23
5.	Zaključak	29

1. Uvod

Kvaliteta zraka postaje sve važnija tema u kontekstu održivog razvoja i zaštite zdravlja ljudi. Brz industrijski razvoj, urbanizacija i povećanje broja vozila u gradovima značajno doprinose zagađenju zraka. U takvim uvjetima, mjerenje i kontrola kvalitete zraka postaju ključni za osiguranje zdravog okruženja. Postoje brojna rješenja za mjerenje i kontrolu kvalitete zraka, koja koriste različite senzore i metode za detekciju zagađivača i upravljanje sustavima za ventilaciju i gašenje požara.

Jedan od primjera takvih sustava su mreže senzora za praćenje kvalitete zraka koje koriste različite senzore za mjerenje koncentracija čestica, razine CO₂, temperature, vlage i drugih parametara. Ovi sustavi su široko rasprostranjeni u urbanim sredinama, industrijskim postrojenjima i zatvorenim prostorima poput ureda i stambenih zgrada. Njihova korisnost leži u mogućnosti pravovremene reakcije na povećane razine zagađenja, čime se smanjuje izloženost štetnim tvarima i poboljšava kvaliteta zraka.

Sustavi za mjerenje kvalitete zraka često koriste senzore čestica koji detektiraju prisutnost i koncentraciju čestica u zraku. Ovi senzori koriste različite tehnologije, poput laserske difrakcije, za precizno mjerenje koncentracije čestica različitih veličina. Uz to, senzori za mjerenje tlaka, temperature i vlage omogućuju praćenje dodatnih parametara koji utječu na kvalitetu zraka. Senzori dima su također ključni za detekciju dima i potencijalno opasnih situacija koje mogu dovesti do požara. Jedan od glavnih izazova u dizajniranju sustava za mjerenje kvalitete zraka je integracija različitih senzora i obrada velikih količina podataka u stvarnom vremenu. Moderni sustavi često koriste mikrokontrolere poput ESP32, koji omogućuju učinkovitu obradu podataka, povezivanje s mrežom i postavljanje web servera za prikaz podataka. Korištenje grafova za vizualizaciju izmjerenih vrijednosti omogućuje korisnicima lakše praćenje promjena u kvaliteti zraka i donošenje informiranih odluka o potrebnim mjerama.

Motivacija za odabir ovakvog sustava leži u želji za stvaranjem rješenja koje ne samo da mjeri i prikazuje podatke o kvaliteti zraka, već i aktivno reagira na promjene u okolini. Automatsko upravljanje ventilatorom i sustavom za gašenje požara na temelju izmjerenih vrijednosti osigurava brzo i učinkovito smanjenje rizika od zagađenja i požara. Uz to, mogućnost manualnog upravljanja sustavom pruža korisnicima dodatnu fleksibilnost i kontrolu nad okolinom. Na ovaj način, sustav ne samo da doprinosi poboljšanju kvalitete zraka, već i povećava sigurnost i udobnost prostora u kojem se koristi.

1.1. Zadatak i struktura rada

Cilj ovog projekta je razviti sustav za mjerenje i upravljanje kvalitetom zraka u zatvorenim prostorima koristeći kombinaciju senzora za praćenje različitih parametara okoliša. Sustav koristi senzor MQ135 za mjerenje kvalitete zraka (posebno koncentracije CO₂), DHT22 senzor za mjerenje temperature i vlažnosti, te BMP180 senzor za mjerenje tlaka i nadmorske visine. Podaci prikupljeni ovim senzorima se zatim koriste za automatsko upravljanje ventilatorom i sustavom za gašenje požara (prskalice za vodu), s ciljem održavanja optimalne kvalitete zraka i sigurnosti prostora. Zbog prevelike cijene nije bilo moguće implementirati sustav za gašenje požara odnosno prskalice za vodu te su one reprezentirane kao LED-ica koja svijetli ovisno o stanju prskalica.

Očekivani rezultati projekta uključuju:

1. **Praćenje kvalitete zraka:** Sustav će kontinuirano pratiti razine CO₂, temperature, vlažnosti i tlaka zraka. Podaci će biti prikazani na web sučelju putem ESP32 mikrokontrolera i na Arduino IDE *serial monitor*-u (hrv. serijski monitor, sučelje za prikaz rezultata), omogućujući korisnicima pregled trenutnih vrijednosti i povijesti mjerenja za posljednjih 7 dana.
2. **Automatsko upravljanje ventilatorom i sustavom za gašenje požara:** Na temelju izmjerenih vrijednosti kvalitete zraka, sustav će automatski upravljati ventilatorom. Ako koncentracija CO₂ pređe određeni prag, ventilator će se automatski uključiti kako bi se poboljšala kvaliteta zraka, te ako se dostigne određena temperatura zraka i određena koncentracija CO₂ uključiti će se sustav za gašenje požara.
3. **Sigurnosne mjere:** U slučaju da senzor MQ135 detektira visoke razine zagađenja ili dima, sustav će automatski aktivirati relej za pokretanje ventilatora ili prskalica za gašenje požara, ovisno o situaciji. Također, korisnici će imati mogućnost ručnog upravljanja sustavom putem gumba za uključivanje/isključivanje prskalica.
4. **Integracija s Adafruit IO:** Podaci će se slati na Adafruit IO platformu, omogućujući daljinski pristup i praćenje mjerenja u stvarnom vremenu.

Na kraju, projekt će osigurati sveobuhvatan sustav za poboljšanje kvalitete zraka u zatvorenim prostorima, kombinirajući automatsku kontrolu, sigurnosne mjere i jednostavnu vizualizaciju podataka za korisnike. Ovaj sustav će biti koristan za različite aplikacije, uključujući stambene prostore, urede, industrijske objekte i druge zatvorene prostore gdje je kvaliteta zraka od ključne važnosti.

2. Sustav za mjerenje kvalitete zraka

Zatvoreni prostori često imaju lošu kvalitetu zraka zbog nakupljanja CO₂, vlage i drugih zagađivača. Tradicionalni sustavi za ventilaciju često nisu dovoljno učinkoviti u održavanju optimalne kvalitete zraka, što može dovesti do nelagode i zdravstvenih problema za ljude koji borave u tim prostorima.

Problem:

- Loša kvaliteta zraka može uzrokovati zdravstvene probleme.
- Tradicionalni sustavi za ventilaciju često ne osiguravaju dovoljno svježeg zraka.
- Nema mogućnosti praćenja kvalitete zraka u stvarnom vremenu.

Na tržištu postoje različiti sustavi za praćenje kvalitete zraka, ali većina njih je komercijalna i skupa. Neki od njih uključuju:

- **Netatmo Healthy Home Coach:** Sustav za praćenje kvalitete zraka koji koristi više senzora za mjerenje CO₂, vlažnosti, temperature i buke. Prikazuje podatke putem mobilne aplikacije.
- **Awair:** Napredni uređaj za praćenje kvalitete zraka koji mjeri prašinu, kemikalije, CO₂, temperaturu i vlažnost. Također nudi mobilnu aplikaciju za praćenje podataka.
- **Foobot:** Uređaj koji mjeri čestice, kemikalije, temperaturu i vlažnost te pruža preporuke za poboljšanje kvalitete zraka putem mobilne aplikacije.

2.1. Teorijski osvrt na sustav za mjerenje kvalitete zraka

Funkcioniranje sustava za praćenje i regulaciju kvalitete zraka temelji se na nekoliko ključnih fizikalnih zakonitosti i principa, uključujući kemijske reakcije, termodinamiku, hidrodinamiku i algoritamske procese za obradu i analizu podataka.

Ključne Fizikalne Zakonitosti i Principi

1. Kemijske Reakcije:

- Senzori za plinove koriste principe kemijske reaktivnosti za detekciju prisutnosti određenih plinova u zraku. Na primjer, MQ135 senzor koristi metal-oksidi poluvodički sloj koji mijenja svoj električni otpor kada je izložen različitim koncentracijama plinova kao što su CO₂, NH₃, benzen, alkohol, dim i druge tvari.

2. Termodinamika:

- Termodinamički principi upravljaju ponašanjem temperature i vlažnosti zraka. Senzori koriste kapacitivni senzor za mjerenje vlažnosti i termistor za mjerenje temperature, pružajući podatke potrebne za regulaciju mikroklimu u prostoru.

3. Hidrodinamika:

- Protok zraka i disperzija plinova unutar zatvorenog prostora slijedi zakone hidrodinamike. Ventilacijski sustav koristi ove principe kako bi osigurao ravnomjernu distribuciju svježeg zraka i uklanjanje zagađenog zraka.

4. Algoritamski Principi:

- Algoritmi za obradu podataka koriste uzročno-posljedične odnose za donošenje odluka temeljenih na mjerenim vrijednostima. Na primjer, kada koncentracija CO₂ premaši određeni prag, algoritam automatski aktivira ventilator kako bi smanjio koncentraciju plina.

Metodologije efekata

1. Praćenje Kvalitete Zraka:

- Senzori kontinuirano prikupljaju podatke o koncentraciji plinova, temperaturi, vlažnosti i tlaku zraka.
- Prikupljeni podaci se periodično šalju na centralnu jedinicu za obradu (mikrokontroler) gdje se analiziraju i pohranjuju.

2. Analiza i Obrada Podataka:

- Algoritmi analiziraju trendove u podacima kako bi identificirali potencijalne probleme s kvalitetom zraka.
- Podaci se uspoređuju s unaprijed definiranim pragovima za kvalitetu zraka.

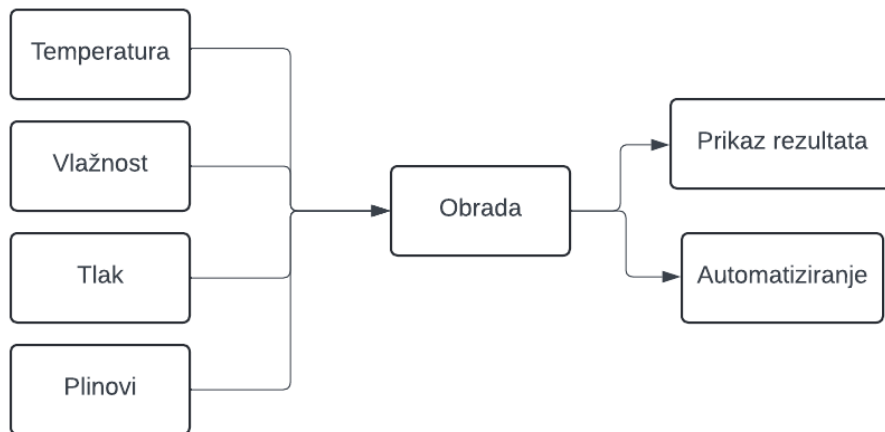
3. Automatska Regulacija:

- Na temelju analize, sustav automatski upravlja ventilacijom i prskalicama kako bi održao optimalnu kvalitetu zraka.
- Ventilator se uključuje kada koncentracija CO₂ premaši određeni prag, a prskalice se aktiviraju u slučaju detekcije određene koncentracije čestica i temperature zraka.

4. Prikaz podataka:

- Mikrokontroler šalje podatke na web sučelje gdje korisnici mogu pratiti trenutne vrijednosti i povijesne trendove.

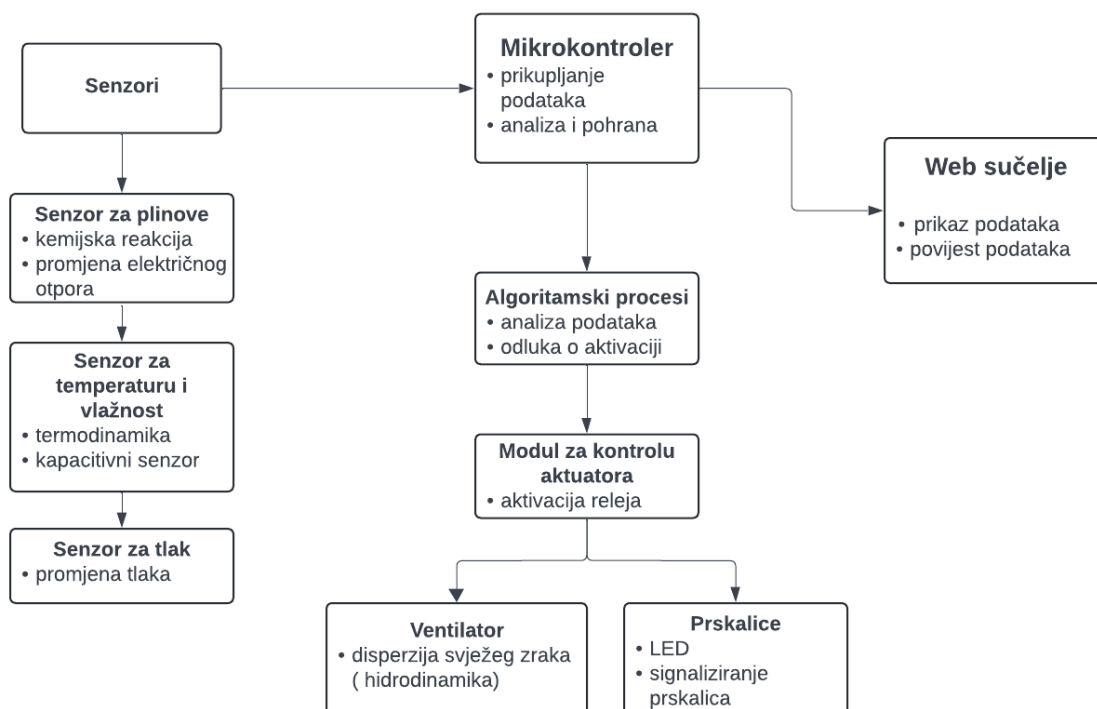
Sljedeća skica prikazuje osnovni koncept sustava za praćenje i regulaciju kvalitete zraka



Slika 2.1.. Osnovni koncept sustava za mjerenje kvalitete zraka

2.2. Prijedlog sklopovskog rješenja

U ovom dijelu prikazat ćemo funkcionalni blok dijagram sustava za praćenje i regulaciju kvalitete zraka. U dijagramu ćemo prikazati ključne komponente sustava i njihove međusobne odnose, te ćemo dati detaljno objašnjenje kako te komponente djeluju jedna na drugu i kako utječu na cjelokupni sustav.



Slika 2.2. Blok dijagram sustava

Senzorski modul

Senzorski modul se sastoji od različitih senzora koji mjere kvalitetu zraka, temperaturu, vlažnost, tlak i prisutnost dima. Svaki senzor generira analogne ili digitalne signale koji predstavljaju izmjerene vrijednosti.

Komponente:

- Senzor za plinove i dim
- Senzor za temperaturu i vlažnost
- Senzor za tlak

Svi senzori su povezani s glavnim mikrokontrolerom koji prikuplja njihove podatke. Senzori šalju svoje podatke mikrokontroleru. Analogni signali iz senzora plinova, temperature i vlažnosti prolaze kroz ADC pretvarače unutar mikrokontrolera koji ih pretvara u digitalne podatke za obradu.

Mikrokontroler

Mikrokontroler je središnja jedinica sustava koja prikuplja podatke sa senzora, obrađuje te podatke i donosi odluke o aktivaciji ostalih modula sustava.

Komponente:

- Analogno-digitalni pretvarači (ADC) za senzore koji šalju analogne signale
- Ulazi za digitalne signale
- Procesorska jedinica za obradu podataka

Mikrokontroler je povezan sa svim sensorima, te s modulom za prikaz podataka i modulom za kontrolu aktuatora.

Modul za prikaz podataka

Modul za prikaz podataka omogućava korisniku pregled izmjerenih vrijednosti u stvarnom vremenu putem web sučelja.

Komponente:

- ESP32 za bežičnu komunikaciju i web server

Modul za prikaz podataka prima obrađene podatke od mikrokontrolera i prikazuje ih korisniku. ESP32 djeluje kao web server, omogućavajući korisnicima pregled podataka putem web sučelja. Također, mikrokontroler može slati podatke na lokalni zaslon za brzi pregled.

Modul za kontrolu aktuatora

Modul za kontrolu aktuatora upravlja ventilatorom i prskalicama na temelju odluka koje donosi mikrokontroler.

Komponente:

- Relejni moduli za upravljanje strujom aktuatora
- Ventilatori
- Prskalice (LED)

Modul za kontrolu aktuatora prima signale od mikrokontrolera i na temelju tih signala aktivira ili deaktivira ventilator i prskalice (LED). Ako koncentracija štetnih plinova premaši zadani prag, mikrokontroler šalje signal relejnom modulu koji aktiviraju ventilator ili prskalice.

Napajanje

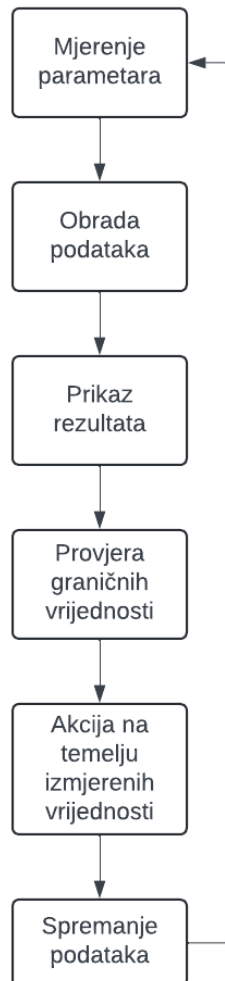
Sustav napajanja osigurava stabilan izvor napona za sve komponente sustava.

Komponente:

- Regulatori napona
- Napajanje iz mreže

Sustav napajanja osigurava potrebne napone za senzorski modul, mikrokontroler i modul za kontrolu aktuatora kako bi se osiguralo njihovo pravilno funkcioniranje

2.3. Prijedlog programskog rješenja



Slika 2.3. Osnovni blok dijagram algoritma

Prvi blok se odnosi na mjerenje parametara s senzora gdje se parametri odnosno vrijednosti senzora prikupljaju u intervalima. Zatim se podaci prikupljeni od senzora obrađuju i analiziraju kako bi se utvrdila trenutna kvaliteta zraka. Ovo može uključivati filtriranje podataka, uklanjanje šuma i izračunavanje prosječnih vrijednosti te prikaz podataka s senzora na monitor. Nakon toga slijedi provjera jesu li izmjerene vrijednosti parametara zraka unutar prihvatljivih granica. Ako neki parametar prelazi graničnu vrijednost, prelazi se na akcijski blok. Ako su izmjerene vrijednosti izvan prihvatljivih granica, sustav može poduzeti određene akcije, poput aktiviranja ventilacije, alarma ili obavijesti korisnicima. Te na kraju spremanje samih podataka na server i ponovno čitanje podataka.

3. Realizacija sustava za mjerenje kvalitete zraka

3.1. Korištene komponente, alati i programska podrška

Sustav za mjerenje kvalitete zraka je uspješno izrađen koristeći sljedeće komponente.

- **ESP32-WROOM**

- **Uloga i Funkcija:** Glavni kontroler projekta. ESP32 WROOM je mikrokontroler s integriranom Wi-Fi i Bluetooth funkcionalnošću, što omogućuje prikupljanje podataka s senzora i njihovu bežičnu komunikaciju.
- **Najvažnije tehničke karakteristike:**
 - Dual-core procesor
 - Wi-Fi i Bluetooth konekcija
 - Niska potrošnja energije
 - Podrška za različite periferije (GPIO, I2C, SPI, ADC, DAC)

- **DHT22**

- **Uloga i Funkcija:** Senzor za mjerenje temperature i vlažnosti zraka
- **Najvažnije tehničke karakteristike:**
 - Temperaturni raspon: -40°C do 80°C, točnost $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
 - Vlažnost zraka: 0% do 100%, točnost $\pm 2-5\%$
 - Digitalni izlaz

- **MQ135**

- **Uloga i Funkcija:** Senzor za mjerenje kvalitete zraka, posebno koncentracije različitih plinova (NH₃, NO_x, alkohol, benzen, dim, CO₂).
- **Najvažnije tehničke karakteristike:**
 - Analogni i digitalni izlaz
 - Brzo vrijeme odziva

- **BMP180**

- **Uloga i Funkcija:** Senzor za mjerenje barometarskog tlaka i temperature.
- **Najvažnije tehničke karakteristike:**
 - Raspon tlaka: 300-1100 hPa, točnost ± 1 hPa
 - Temperaturni raspon: -40°C do 85°C
 - Digitalni izlaz preko I2C ili SPI

- **Releji**
 - **Uloga i Funkcija:** Elektronička komponenta koja omogućuje upravljanje visokim naponom (npr. ventilacijskim sustavom) pomoću signala niskog napona iz ESP32.
 - **Najvažnije tehničke karakteristike:**
 - Napon namota: 5V
 - Maksimalna struja: 10A
 - Tipično korištene za prekidanje visokih napona
- **LED**
 - **Uloga i Funkcija:** Indikator statusa sustava. LED diode se koriste za vizualno obavješćavanje korisnika o stanju sustava, kao što su mjerenja ili upozorenja.
- **Regulator napajanja**
 - **Uloga i Funkcija:** Regulator napajanja za stabilizaciju napona, osigurava ispravno napajanje ventilatora.

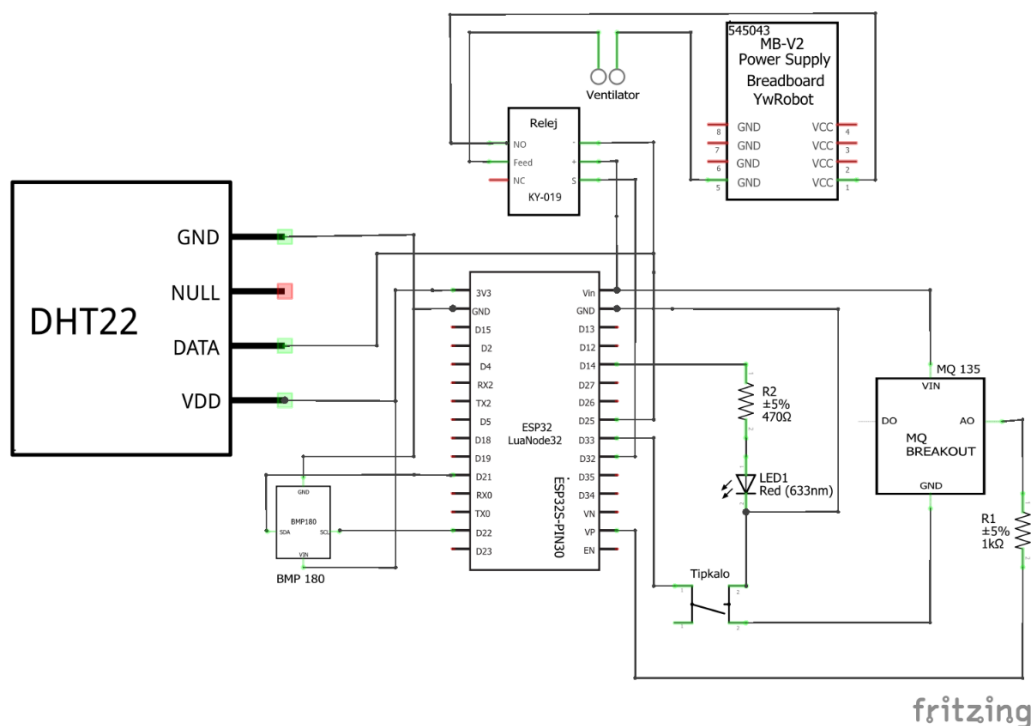
Svaka od ovih komponenti igra ključnu ulogu u funkcionalnosti projekta. Senzori (DHT22, MQ135, BMP180) prikupljaju podatke o okolišu, ESP32 WROOM procesira te podatke i upravlja relejom, koji može aktivirati sustave za kontrolu okoliša, dok LED pruža vizualne povratne informacije. Regulator napajanja HW-131 osigurava stabilno napajanje ventilatora.

Također je korišteno sljedeće programsko okruženje za izradu sustava je

- **Arduino IDE:**
 - Arduino IDE je softverska platforma koja omogućuje korisnicima jednostavno pisanje, kompiliranje i učitavanje koda na Arduino mikrokontrolere. Dizajnirana je kako bi bila pristupačna za početnike, a istovremeno dovoljno moćna za iskusne korisnike. Pruža jednostavno korisničko sučelje, podršku na više platformi, velik broj ugrađenih biblioteka za podršku različitim senzorima, te serijski monitor za komunikaciju mikrokontrolera i računala putem serijskog porta i za ispisivanje poruka, dijagnosticiranje problema i testiranje koda.

3.2. Realizacija konstrukcijskog i sklopovskog rješenja

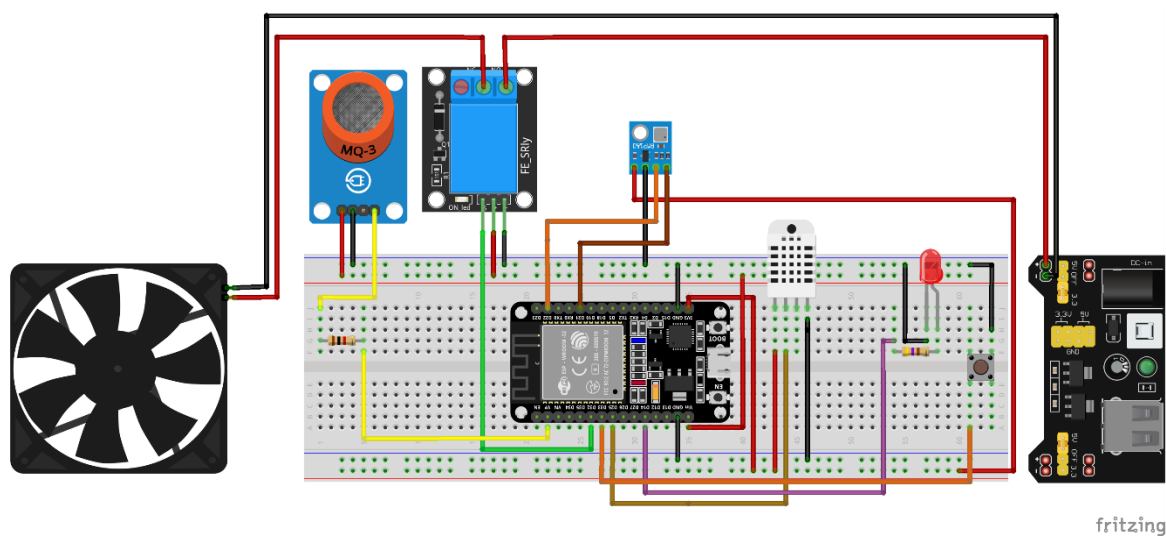
Na sljedećoj slici je prikazana sama električna shema sustava za mjerenje kvalitete zraka.



Slika 3.1. Električna shema

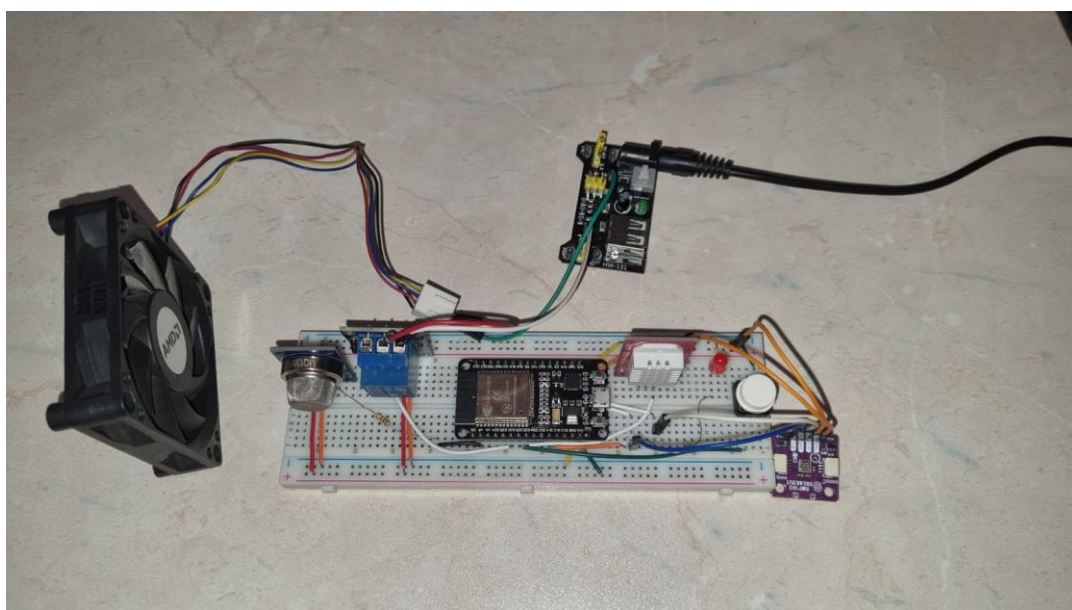
Kako vidimo na slici da je senzor za temperaturu i vlažnost zraka DHT22 spojen preko DATA priključka na ulaz mikrokontrolera na priključak D25, te je bilo potrebno spojiti napon i uzemljenje na sam senzor kako bi mogao ispravno raditi. Zatim imamo senzor za mjerenje tlaka BMP 180 na kojem je također spojen napon i uzemljenje iz pomenutog razloga, te je taj senzor bilo potrebno spojiti pomoću 2 priključka na mikrokontroler. BMP 180 radi na osnovi I2C komunikacije te je bilo potrebno spojiti SCL i SDA priključke samog senzora na SCL (D22) i SDA (D21) priključke mikrokontrolera kao što je prikazano na gornjoj shemi. Poslednji senzor koji je spojen je senzor za kvalitetu zraka MQ 135 na kojeg je doveden napon i uzemljenje te analogni izlaz senzora na ulaz GPIO36 (na shemi označen s 'EN') mikrokontrolera preko otpornika od 1kΩ. Spojena je i LED koja signalizira sustav za gašenje požara preko otpornika od 470Ω, tipkalo koje služi za ručno upravljanje samim sustavom koji je spojen na ulaz D33. Te na kraju je bilo potrebno spojiti sam aktuator sustava odnosno ventilator koji pročišćava zrak, ventilator je spojen preko releja koji je spojen na ulaz D32 mikrokontrolera, na relej je također doveden napon i uzemljenje, ventilator je spojen preko releja tako da se relej ponaša kao sklopka te kada dođe signal s priključka D32 strujni krug bude zatvoren, odnosno strujni krug s modula za dovođenje 12V koji su potrebni ventilatoru. Sam modul za dovođenje napona je spojen preko adaptera na izmjeničnu mrežu.

Na sljedećoj slici je prikazana breadboard (hr. ploča za povezivanje) shema u Fritzing-u.



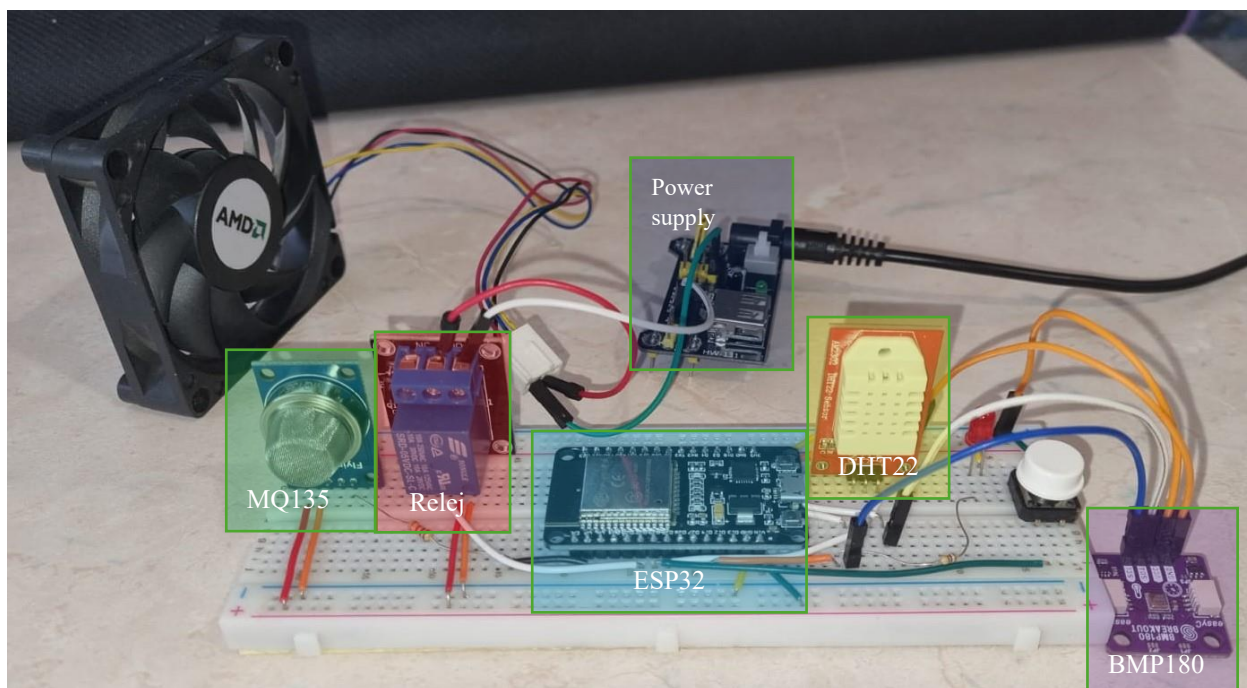
Slika 3.2. Breadboard shema

Sada vidimo jednostavnije i jasnije komponente koje smo koristili te kako su one u stvarnosti povezane na isti breadboard što je vidljivo sljedećom slikom.



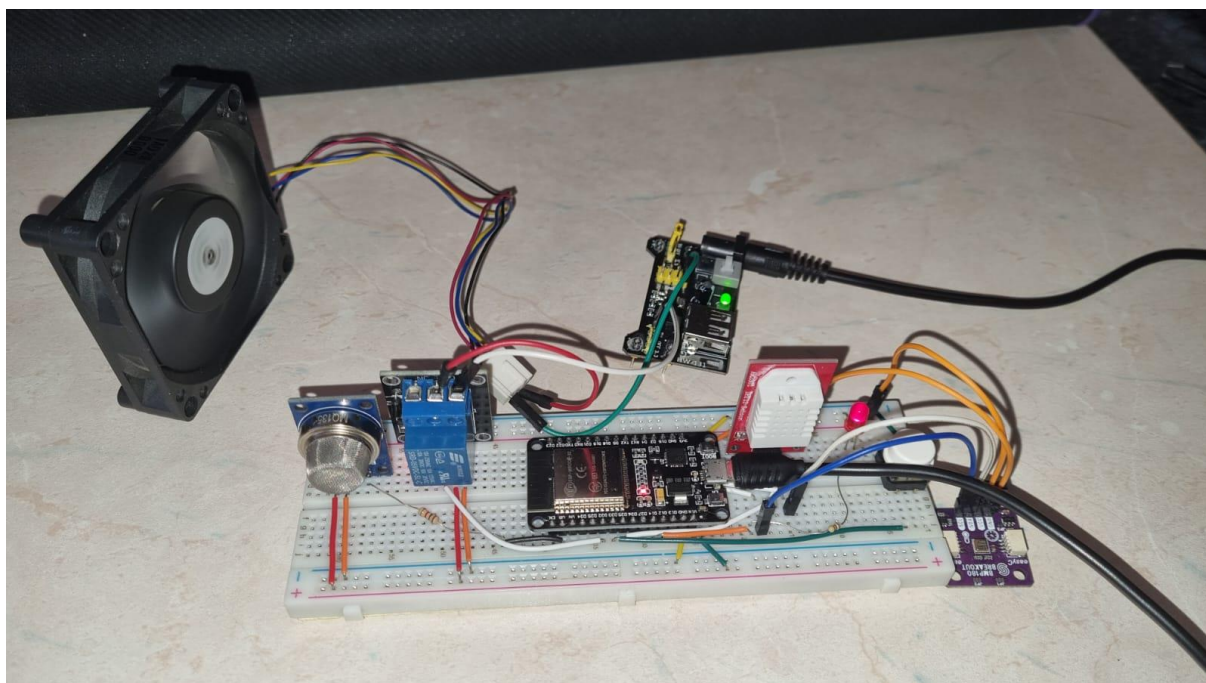
Slika 3.3. Gotov hardverski projekt

Na sljedećoj slici vidimo označene komponente odnosno senzore, mikroupravljač i modul za napajanje radi lakšeg raspoznavanja istih.



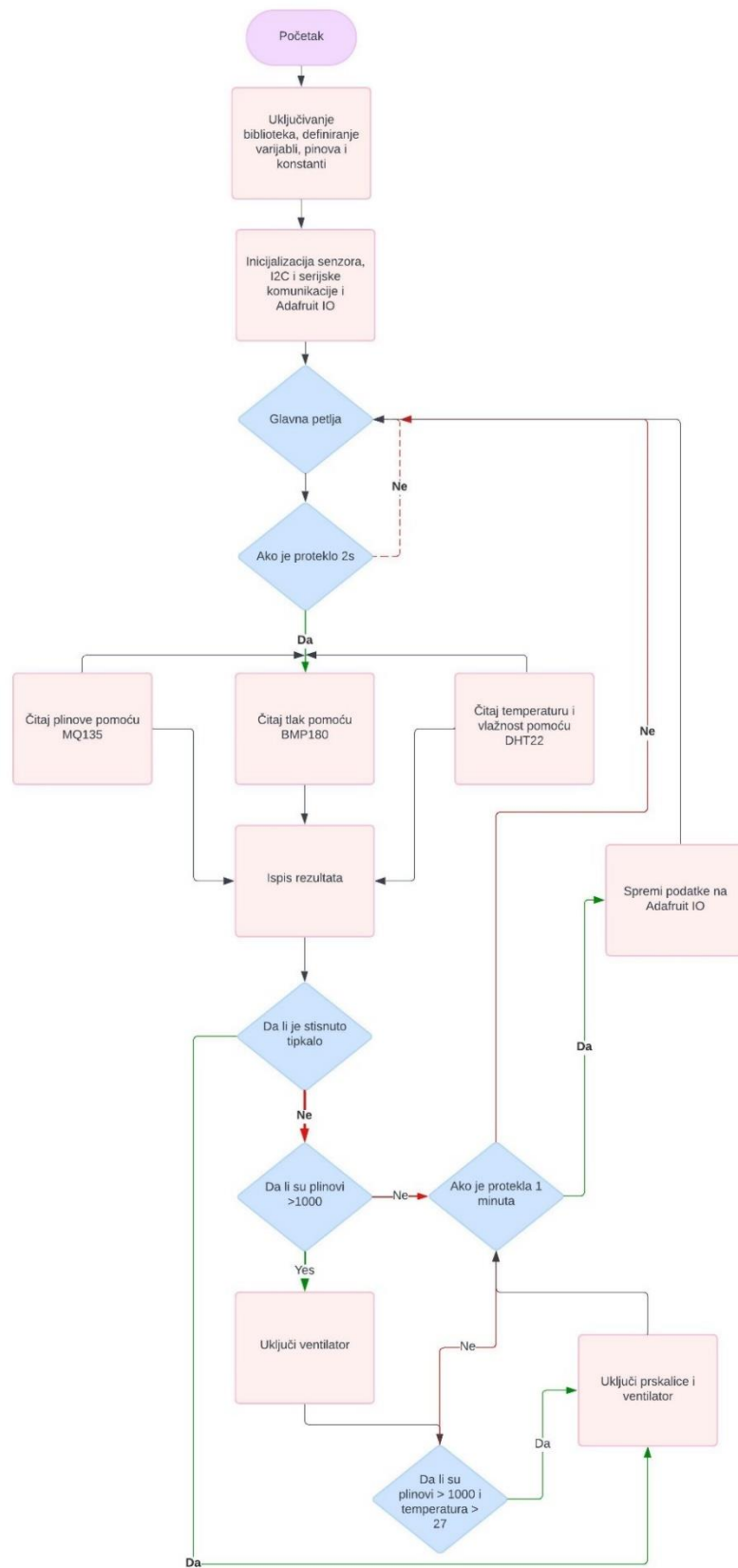
Slika 3.4. Označene komponente sustava

Te sljedećom slikom vidimo i sam sustav kada je priključen napon odnosno dok je sustav uključen i u funkciji, vidimo kako se ventilator vrti zbog određenog iznosa kvalitete zraka i temperature, te s ventilatorom također je uključena i LED-ica koja signalizira vodene prskalice za gašenje požara.



Slika 3.5. Sustav u pogonu

3.3. Realizacija programskog rješenja



Slika 3.6. Detaljan blok dijagram

Na samom početku programskog rješenja imamo uključivanje biblioteka koje su bile neophodne za dobivanje podataka s senzora i za Adafruit IO web server. Definirani su i podaci za web server kao što su podaci o mreži na kojoj je povezan sam ESP32. Definirali smo pinove na koje će biti povezani senzori s ESP32 te pomoćne varijable i konstante koje su nam potrebne za rad s senzorima.

Nakon toga slijedi sama inicijalizacija gdje se postavljaju pinovi za senzore, pokretanje serijske i I2C komunikacije za rad s senzorom te za ispis rezultata na monitor, spajanje na Adafruit IO koji služi za pohranu podataka, te samo inicijaliziranje korištenih senzora. Uz inicijaliziranje bilo je potrebno i napraviti provjere da li je uspješno realizirana serijska komunikacija, da li je realizirana veza s Adafruit IO web serverom, te provjera inicijalizacije senzora. Ako je bila neuspješna inicijalizacija obavijestit će se korisnik s prikladnom porukom.

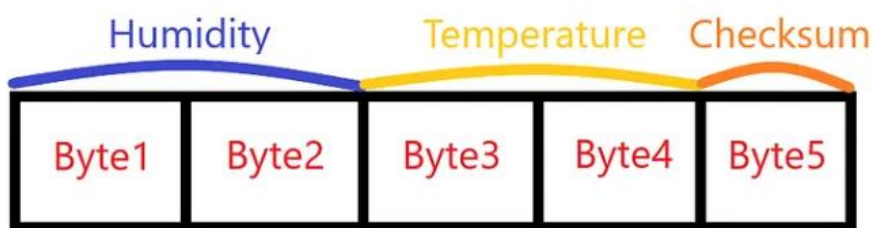
Zatim glavna petlja koja čita podatke s senzora i provjerava granične vrijednosti. Na početku glavne petlje se pokreće Adafruit IO komunikacija, te nakon toga imamo provjeru vremenskih intervala odnosno, imamo 2 timer-a koji prate koliko je vremena prošlo od ispisivanja rezultata i slanja rezultata na web server. To je bilo potrebno napraviti iz razloga što bi se rezultat trebao prikazati odmah na monitoru, a rezultati koji se šalju na server se moraju ograničiti zbog prevelike količine podataka koji se šalju. Ako je zadovoljen prvi uvjet odnosno ako su prošle 2 sekunde od ponovnog pokretanja petlje ili mikrokontrolera onda se čitaju podaci s senzora, izračunava se temperatura, vlažnost zraka, ppm, tlak i nadmorska visina te se ispisuju isti podaci na serijski monitor. Ako su podaci neuspješno pročitani, odnosno ako je došla nekakva smetnja kao npr. veza između senzora i mikroupravljača se prekinula onda će se ispisati odgovarajuća poruka. Zatim se provjeravaju granične vrijednosti tj. ako je pritisnuto tipkalo kojim manuelno upravljamo sustavom uključuje se ventilator i prskalice (LED), ako ne onda se provjerava granična vrijednost za plinove te ako je veća od 1000ppm uključuje se ventilator, zatim se provjerava temperatura te ako je i ona veća od 27 °C upalit će se i prskalice za vodu (LED). Odnosno ako je ispunjen zadnji uvjet uključit će se i prskalice i ventilator.

Na kraju imamo slanje podataka na web server, tj. ako je prošla jedna minuta onda se podaci šalju na Adafruit web server, a ako nije ide se na početak petlje koja se izvodi beskonačno ili do isključenja samog mikrokontrolera.

U nastavku slijedi objašnjenje funkcija koje su realizirane kako bi dobili podatke od senzora. Nisu korištene nikakve biblioteke, funkcije su realiziranje uz pomoć shvatanja kako koji senzor radi te uz pomoć jednostavnih biblioteka kao npr. „Wire.h“.

3.3.1. Čitanje podataka s senzora DHT22

Da bi smo napisali funkciju pomoću koje dobivamo podatke s DHT22 prvo je potrebno razumjeti kako senzor radi. DHT22 je digitalni senzor za mjerenje temperature i vlage koji koristi kapacitivni senzor za mjerenje vlažnosti zraka i termistor za mjerenje temperature. Unutar senzora nalazi se mikrokontroler koji uvijek sluša dana priključak senzora. Kada je taj priključaj pokrenut (promjena stanja na priključku) od strane drugog mikroupravljača, onda mikroupravljač senzora krene slati podatke o vlažnosti i temperaturi u digitalnom obliku. Znači prvo je potrebno na početku 'probuditi' senzor s logičkom 0 u trajanju od 18ms kako bi senzor znao da se započinje komunikacije, zatim se postavlja pin (hr. priključak) na HIGH (hr. logička 1) u trajanju od 20-40 μ S. Zatim se čita odgovor senzora tako da se pin postavi na ulaz i pričekava se da senzor pošalje LOW (hr. logička 0) signal (80 μ S), zatim HIGH signal (80 μ S). Senzor šalje 40-bitni podatak (5 bajtova) u sljedećem formatu: 8 bitova vlažnosti, 8 bitova vlažnosti decimalno, 8 bitova temperature, 8 bitova temperature decimalno, i 8 bitova checksum. Potrebno je čitati svaki bit tako da se mjeri trajanje visokog signala: 26-28 μ s predstavlja logičku 0, dok 70 μ s predstavlja logičku 1. Na kraju slijedi provjera ispravnosti podataka tako da se izračuna checksum zbrajanjem prva četiri bajta i taj rezultat mora biti jednak petom bajtu. To je postignuto funkcijom `readDHT22(data)` koja prima prazno polje od 5 elemenata po 8 bajtova. Te se zatim izvodi kod koji je opisan i funkcija šalje 'true' ili 'false' vrijednosti, te vrijednosti nam govore da li je podatak dobro pročitao ili ne (checksum).



Slika 3.7. Polje s podacima o temperaturi i vlažnosti zraka

3.3.2. Čitanje podataka s senzora MQ135

MQ135 je senzor za detekciju raznih plinova (amonijak, alkohol, benzen, dim, CO₂). Senzor koristi metal-oksidni poluprovodnik za detekciju prisutnosti plinova. Otpor senzora mijenja se u prisutnosti različitih koncentracija plinova. Kako bi dobili podatke s senzora potrebno je mjeriti otpor tako što se mjeri napon na analognom ulazu na kojem je spojen sam senzor s mikroupravljačem. Zatim uz pomoć formule računa napon u koncentraciju plina. Detaljnije je objašnjeno u nastavku.

Prvo je potrebno izračunati korekcijski faktor na temelju temperature i vlažnosti. Korekcijski faktor se razlikuje za temperature ispod i iznad 20°C. Korekcijski faktor smo računali pomoću funkcije `getCorrectionFactor(t,h)` koja prima temperaturu i vlažnost zraka, a izlaz funkcije je vrijednost koja kasnije služi za dobivanje ispravljenije vrijednosti otpora senzora. Zatim smo samo ispitali da li je temperatura niža od 20, te ako je koristili smo jednu formulu, a ako je viša koristili smo drugu formulu. Formule su vidljive kasnije u dokumentaciji u kodu, te za izračun korekcijskog faktora koristili smo globalne varijable (COREA, COREB, COREC, CORED). Parametri CORA, CORB, CORC, CORD, CORE, CORF i CORG koji se nalaze u kodu služe za modeliranje zavisnosti MQ135 senzora od temperature i relativne vlage. Ovi parametri nisu jedinstveni za MQ135 senzor, već su empirijski dobiveni i odnose se na specifičnu funkciju koja pokušava da kvantificira kako se otpornost senzora mijenja u različitim temperaturama i vlažnostima. Formulu za `getCorrectionFactor(t, h)` je izvedena na osnovu eksperimentalnih podataka ili analize. Ovi parametri se koriste kako bi se prilagodila otpornost senzora na različite uslove okoline, što omogućava preciznije mjerenje koncentracije CO₂.

Nakon toga u funkciji `getResistance(pin)` računamo sam otpor senzora na temelju analognog očitavanja s odgovarajućeg pina. Čitamo vrijednost s analognom pina, zatim je skaliramo da dobijemo vrijednosti od 0 do 1024, skalirali smo je s vrijednosti 4095 jer je ADC kod ESP32 12-bitni. Te na kraju smo pomnožili dobivenu vrijednost s unutarnjim otporom kojeg smo pretpostavili da je 10kΩ.

Funkcija `getCorrectedResistance(resistance,t,h)` prima parametre otpor (već izračunati otpor senzora), temperaturu i vlažnost koji služe za dobivanje korekcijskog faktora. Funkcija vraća ispravljenju (korigiranu) vrijednost otpora senzora koji ovisi o temperaturi i vlažnosti zraka (rezultati mjerenja na taj način su precizniji nego da smo samo pretvarali čistu vrijednost otpornika s analognog pina senzora u koncentraciju plinova).

Na kraju računamo koncentraciju plinova, funkcija `getPPM (resistance, t, h)` prima otpor senzora, temperaturu i vlažnost zraka, te pomoću tih parametara se računa popravljena vrijednost otpora senzora, te se on uvrštava u formulu s dodatnim parametrima kako bi dobili konačnu koncentraciju plinova. Korišteni parametri u formuli su RZERO koji predstavlja kalibracijski otpor pri atmosferskom CO₂ nivou, PARA i PARB su kao već pomenuti parametri empirijski dobiveni, odnosno eksperimentalno. Često se ovi parametri određuju kroz eksperimente gdje se senzor izlaže različitim poznatim koncentracijama CO₂ i mjere se njegove otpornosti. Zatim se na osnovu tih

mjerenja može napraviti model koji povezuje otpornost senzora sa koncentracijom CO₂, koristeći parametre poput PARA i PARB.

3.3.3. Čitanje podataka s senzora BMP 180

BMP180 je senzor za mjerenje atmosferskog pritiska i temperature (temperatura utiče na vrijednost tlaka te se zbog toga mjeri i temperatura kako bi bili točni rezultati). Senzor koristi piezoelektrični efekat za mjerenje pritiska i termistor za mjerenje temperature. Podaci se prenose preko I2C komunikacije. Dobiveni analogni signal pretvara se u digitalni pomoću ADC-a. BMP180 ima integriranu EEPROM memoriju s podacima za kalibraciju. Senzor prvo mjeri sirove vrijednosti temperature i pritiska, koje se zatim kalibriraju koristeći pohranjene kalibracijske podatke. Svaki senzor ima posebni, specifični 176bitni niz podataka koji se koristi za otklanjanje šumova, kompenzaciju pomaka i određivanje ovisnosti o temperaturi. To su zapravo zapisi o omjerima stvarnih i očitanih mjerenja, a upravo oni omogućavaju precizne izračune konačnih vrijednosti pritiska i temperature.

Prvo se zadaje način rada senzora te zatim se čitaju kalibracijski podaci iz EEPROM memorije koje očitavamo preko I2C-a, to radi funkcija „begin(mode)“ koja prima način rada senzora (govori o tome koliki će delay (hrv. odgoda) biti između čitanja podataka te tako rezultati ovise o brzini čitanja podataka) te vraća „true“ ako su podaci uspješno pročitani.

Zatim se računa atmosferski pritisak pomoću „readPressure (void)“ funkcije. Nakon ADC konverzije dobivamo nekompenzirane vrijednosti: UP – uncompensated preassure (hrv. nekompenzirani pritisak) i UT – uncompensated temperature (hrv. nekompenzirana temperatura). Te vrijednosti su isčitane pomoću funkcije „readRawTemperature(void)“ koja čita sirovu vrijednost temperature s senzora. Piše naredbu za čitanje temperature (BMP085_READTEMPCMD) u kontrolni registar te vraća 16 – bitnu vrijednost iz temperaturnog registra ' BMP085_TEMPDATA'. Funkcija „readRawPressure(void)“ čita sirovu vrijednost pritiska. Piše naredbu za čitanje pritiska (BMP085_READPRESSURECMD) u kontrolni registar te čita 16-bitnu vrijednost pritiska i dodatnih 8 bitova, kombinira ih i vraća rezultat. Te funkcije rade pomoću pomoćnih funkcija koje koriste I2C komunikaciju za čitanje i pisanje podataka:

- **read8:** Čita 8-bitni registar.
- **read16:** Čita 16-bitni registar.
- **write8:** Piše 8-bitnu vrijednost u registar.

Nakon očitavanja sirove temperature i atmosferskog pritiska potrebno je izračunati B5 vrijednost koja je pomoćna varijabla koja se koristi za daljne izračune temperature i pritiska. Koristimo kalibracijske podatke i složene formule za izračun konačnog pritiska.

Funkcija „readAltitude (sealevelPressure) je funkcija koja računa nadmorsku visinu pomoću atmosferskog pritiska i koristi poznatu formulu za izračun nadmorske visine iz pritiska i pritiska na nivou mora.

4. Testiranje i rezultati

4.1. Metodologija testiranja

U ovom poglavlju ćemo opisati metodologiju koja će se koristiti prilikom testiranja sustava za mjerenje kvalitete zraka. Testiranje će obuhvatiti provjeru ispravnosti svih dijelova sustava, uključujući senzore, mikrokontroler i programski kod, te će se provesti u različitim uvjetima kako bi se osigurala vjerodostojnost rezultata. Prvo ćemo testirati ispravnost mikrokontrolera, zatim sprovesti ispravnost programskog koda i senzora, odnosno da li će sustav ispravno (onako kako je zadano) raditi promjenom vanjskih parametara.

Provedba ispravnosti mikrokontrolera

Prvo je potrebno testirati ispravnost glavnog dijela našeg sustava i komunikaciju s Adafruit IO web servera. Testiranje mikrokontrolera provodimo tako da testiramo ispravnost prikupljanja podataka s senzora, odnosno da li mikrokontroler ispravno prikuplja podatke s samih senzora i pohranjuje ih u odgovarajući format. To možemo testirati tako da uključimo čitav sustav i provjeravamo vrijednosti naših senzora da li su u uvjetima normale, tako što čitamo serial monitor i pratimo vrijednosti senzora te manualno upravljamo sustavom za ventilaciju i gašenje požara. Zatim testiramo da li se podaci uspješno šalju na web server tako što uđemo u dashboard (hrv. nadzorna ploča) web servera te uspoređujemo vrijednosti koje su ispisane na serial monitor s vrijednostima koje su prikazane na web serveru.

Testiranje sustava (programskog koda i senzora)

Testiranje istog ćemo razdijeliti na tri slučaja: promjena temperature, vlažnosti i koncentracije plinova u prostoriji što bi trebalo rezultirati aktiviranjem našeg sustava za provjetravanje (automatsko uključivanje ventilatora) i gašenje požara (automatsko uključivanje LED). Također manualno upravljanje našim automatskim sustavom.

Promjena temperature i vlažnosti: Senzori će biti testirani u kontroliranom okruženju (prostorija od 6m²) gdje će se temperatura i vlaga mijenjati uz pomoć klima uređaja. Očitavanja senzora će se uspoređivati s referentnim uređajem za mjerenje temperature (termometar) kako bi se provjerila točnost senzora, vlagu neće biti moguće usporediti zbog nedostatka referentnog uređaja za mjerenje iste. Mjerenje će se provesti na način da ćemo prvo mjeriti temperaturu i vlažnost zraka s uključenom klimom i jednom osobom u prostoriji te zatim bez uključene klime s dvije osobe u prostoriji. Također istovremeno će se mjeriti i koncentracija plinova u prostoriji za oba slučaja, u drugom slučaju koncentracija plinova bi trebala biti neznajno veća zbog povećanja

CO₂. Bitno je napomenuti da se klima uređaj ne nalazi direktno u prostoriji nego u dnevnom boravku te onda kada kažemo da je prostorija klimatizirana to znači da su vrata od sobe otvorena, te s tim kada je prostorija neklimatizirana onda su vrata zatvorena.

Promjena koncentracije plinova (CO₂, butan, alkohol): Senzori će se izložiti različitim koncentracijama različitih plinova u sigurnim uvjetima. Koncentracije plinova neće biti moguće mjeriti pomoću referentnog uređaja zbog nedostatka uređaja za mjerenje istog. Mjerenje će se sprovesti na način da ćemo senzor izlagati različitim plinovima, prvo ćemo uključiti senzor 15 minuta kako bi se zagrijao odnosno kalibrirao kako bi dao ispravne rezultate. Senzor će se kalibrirati u klimatiziranim sobnim uvjetima s jednom osobom u prostoriji i bez izlaganja plinovima. Zatim ćemo senzor izložiti alkoholu kako bi vidjeli očekivani porast vrijednosti senzora, te butanu uz pomoć upaljača. Samo kalibriranje senzora je bilo realizirano prije bilo kakvih provedenih mjerenja. OVDJE DODATI TESTIRANJE S VENTILATOROM

Mjerenje atmosferskog pritiska: U ovom slučaju ne možemo mijenjati vanjske parametre, atmosferski tlak je većinom isti te se ne mijenja tako brzo u kratkom vremenskom periodu, isto to vrijedni i za nadmorsku visinu koja bi trebala mirovati iz razloga što će se testiranje obavljati na istoj lokaciji. Bitno je napomenuti da je se atmosferski tlak mjerio za sve slučajeve promjena parametara. Usporedbu naših rezultata s stvarnim ćemo obaviti tako što ćemo naše rezultate mjeriti s rezultatima koje ćemo naći na meteorološkoj postaji Osijek – Čepin.

Intepretacija rezultata

Rezultati testiranja bit će interpretirani kroz analizu prikupljenih podataka. Ako su odstupanja unutar prihvatljivih granica, sustav će se smatrati vjerodostojnim. U slučaju značajnih odstupanja, analizirat će se uzroci i predložiti poboljšanja. Rezultati će biti ispisani na serial monitor (na Arduino razvojnom okruženju) svake 2s gdje ćemo moći odmah vidjeti rezultate mjerenja u stvarnom vremenu, također će rezultati biti dostupni na web serveru koji će se osvježavati svake minute s stvarnim podacima iščitanih s senzora.

4.2. Rezultati testiranja

Testiranje mikrokontrolera i Adafruit web servera

Kao što je bilo pomenuto prvo smo izveli testiranje mikrokontrolera koje je prošlo uspješno. Mikrokontroler je se uspješno povezao s Adafruit IO web serverom te su se svi senzori uspješno inicijalizirali, dali smislene rezultate te uspješno su ti rezultati (podaci) poslani na web server.

```
Temperatura: 24.70 *C  
Vlažnost: 63.00 %  
PPM: 268.80 ppm  
Pritisak = 100932 Pa  
Visina = 88.46 metara
```

Slika 4.1. Serial monitor s rezultatima



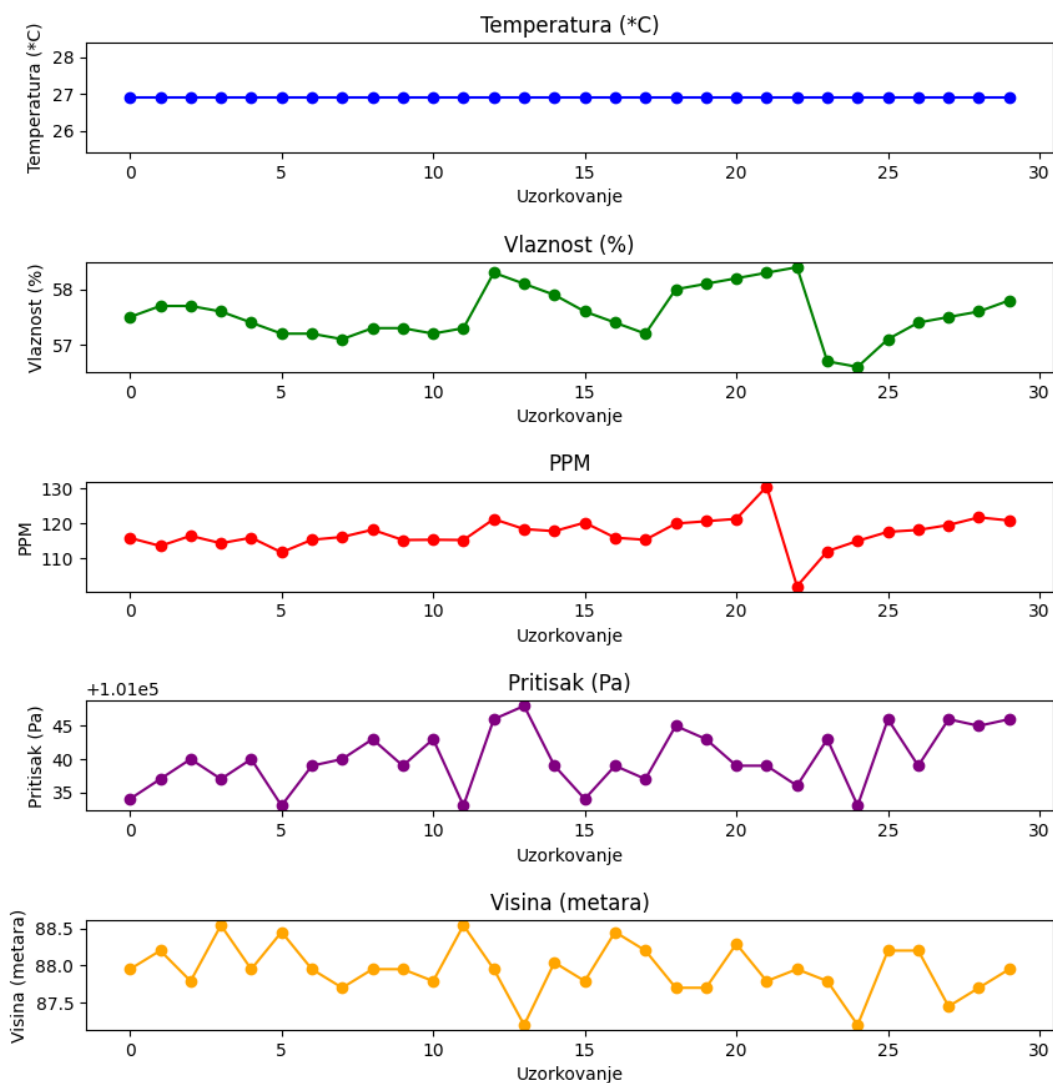
Slika 4.2. Dashboard web servera - prikaz rezultata s web servera

Vidimo da imaju nagli porasti podataka na web serveru, to je zbog toga što su rezultati bili prikazivani u većem vremenskom periodu i zbog uključivanja i isključivanja mikrokontrolera, odnosno rezultati s senzora nisu odmah točni na početku pa je potrebno sačekati 10 minuta kako bi se rezultati stabilizirali i bili smisljeni te zbog toga vidimo nagle poraste podataka.

Rezultati promjene temperature i vlažnosti zraka

Testiranje smo obavili kako je bilo planirano, prvo smo testirali naš sustav u klimatiziranim uvjetima, svake 2 sekunde smo spremali podatke s senzora u trajanju od jedne minute, odnosno

sustav smo testirali 30 puta (30 uzorkovanja), spremili smo srednje vrijednosti senzora, te grafički prikazali podatke s senzora u ovisnosti o vremenu, grafički prikaz podataka s senzora je vidljiv sljedećom slikom.



Slika 4.3. Grafički prikaz podataka s senzora u klimatiziranoj prostoriji

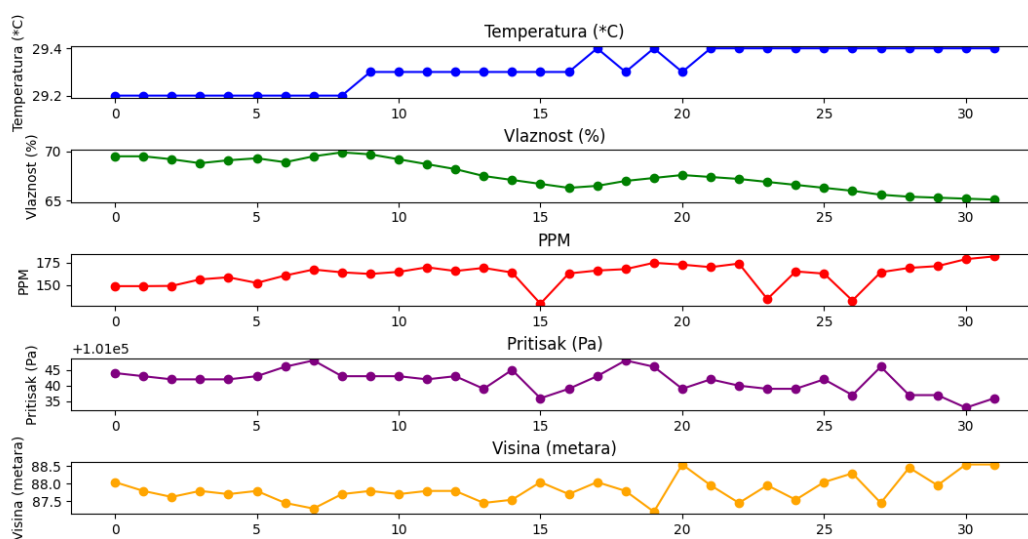
Vidimo da se temperatura vremenom nije mijenjala, bila je konstantna i točna. Termometar je pokazivao istu vrijednost kao i senzor, te je termosta bio postavljen odmah pored samog senzora kako bi dobili što bolju usporedbu rezultata. Vlažnost naime ne možemo usporediti, ali prema specifikacijama senzora znamo da je odstupanje rezultata senzora od stvarnih vrijednost vlage ali i temperature zraka jako mala. Vidimo kako se vlažnost jako malo mijenjala (od 1% do 2%), to je

moguće zbog toga što je senzor bio u blizini osobe pa može doći do manjih oscilacija. Također koncentracija plinova u prostoriji je mirovala, vidimo samo jednu malu oscilaciju koja može nastati iz već pomenutog razloga. Atmosferski pritisak je također jako malo varirao što je moguće zbog elektronskog šuma ili malih promjena u atmosferi, ali rezultati atmosferskog tlaka se razlikuju od stvarnog atmosferskog tlaka u osijeku za $\pm 1\text{hPa}$, toliko odstupanje je moguće iz više razloga, a neki od njih su: interferencija signala, kvaliteta zraka (temperatura i vlažnost zraka), kalibracija, nelinearnost i još drugi faktori. Kako je nadmorska visina usko povezana s atmosferskim pritiskom tako je i ona jako malo varirala, ali vrijednost nadmorske visine je točan. Izračunali smo i srednje vrijednosti podataka kako bi lakše usporedili rezultate sva tri mjerenja.

- Srednja vrednost temperature: 26.90 °C
- Srednja vrednost vlažnosti: 57.56 %
- Srednja vrednost PPM: 117.10
- Srednja vrednost pritiska: 101040.03 Pa
- Srednja vrednost visine: 87.94 metara

Zatim smo isključili klimu, sačekali 15 minuta kako bi zagrijali sobu, te smo testirali sustav u zatvorenoj prostoriji, s dvije osobe u prostoriji, te je prozor bio zatvoren kako bi bila veća koncentracija CO₂ plina, temperatura i vlažnost zraka u prostoriji.

Odavdje prepraviti: Vrijednosti senzora smo testirali 32 puta te sam grafički prikaz podataka je prikazan sljedećom slikom.



Slika 4.4. Grafički prikaz podataka s senzora u neklimatiziranoj prostoriji

Te smo odmah izračunali srednje vrijednosti radi usporedbe podataka.

- Srednja vrednost temperature: 29.31 °C
- Srednja vrednost vlažnosti: 67.58 %
- Srednja vrednost PPM: 161.79
- Srednja vrednost pritiska: 101041.47 Pa
- Srednja vrednost visine: 87.83 metara

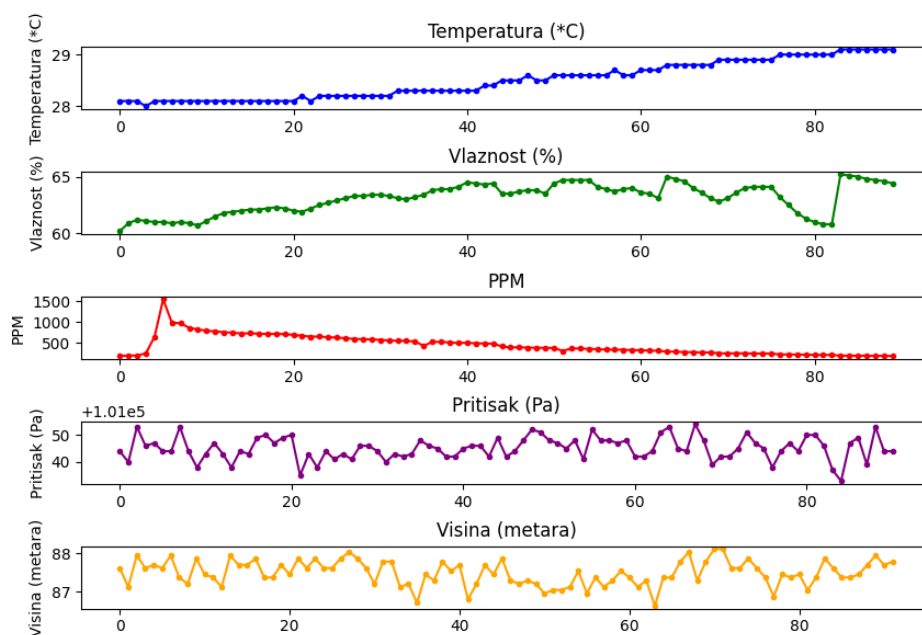
Po rezultatima vidimo da je temperatura porasla za čak 2.4 °C i temperatura je i dalje rasla ali više nismo uzimali uzorke sustava. Rezultati temperature u ovom mjerenju nemaju odstupanje s rezultatima mjerenja s termometrom kao i u prvom slučaju, te s tim zaključujemo da senzor DHT22 daje točne rezultate. Također je i vlažnost zraka porasla što je se i očekivalo zbog toga što je povećan broj ljudi u prostoriji, te zbog toga što je prozor sobe bio zatvoren te nismo imali nikakvog provjetravanja. 0/ Koncentracije plinova pogotovo CO₂ je porasla iz istog razloga, a atmosferski pritisak je blago porastao zbog promjene temperature, sukladno s tim i sama nadmorska visina se malo promijenila.

Kada gledamo grafički prikaz podataka u prostoriji koja nije klimatizirana vidimo da je temperatura konstantno rasla što je i za očekivati, vlažnost zraka je padala jer je vjerojatno došla neka maksimalna vrijednost vlažnosti zraka koja može biti u tim uvjetima te je se krenula onda stabilizirati. Vidimo kako koncentracija CO₂ u prostoriji blago raste s vremenom, te atmosferski pritisak i nadmorska visina imaju sitne oscilacije zbog već navedenih razloga.

Do ovdje prepraviti, testirati ponovo u prostoriji sustav

Rezultati promjene koncentracije plinova u prostoriji

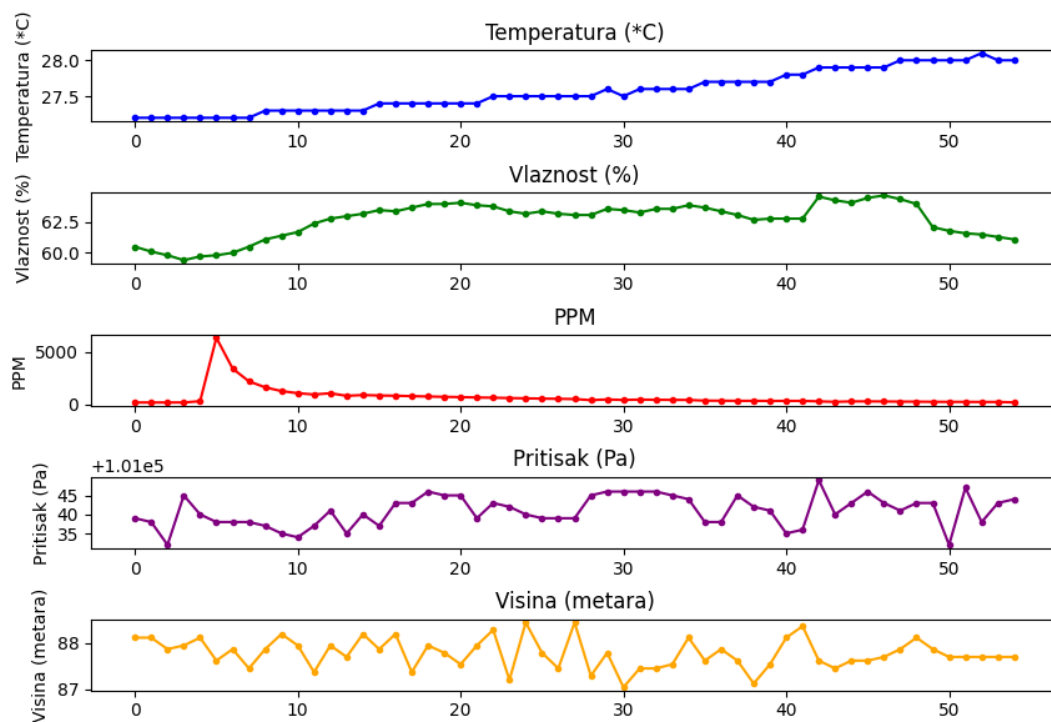
Uz već kalibrirani senzor za mjerenje koncentracije plinova dobili smo rezultate kakve smo i očekivali. Prvo smo izložili senzor alkoholu (40% alkohol) oko 3 sekunde te smo odmah vidjeli porast vrijednosti senzora koje smo prikazali grafički sljedećom slikom.



Slika 4.5. Grafički prikaz vrijednosti senzora na utjecaj alkohola

Vidimo kako je koncentracija plinova s 200ppm naglo skočila preko 1500ppm zbog uticaja butana u zraku. Zatim je se vrijednost senzora smanjivala vremenom postepeno jer smo prestali izlagati senzor alkoholu. Zaključujemo da senzor radi ispravno, a točnost rezultata naime nismo u mogućnosti testirati zbog nedostatka opreme. Također vidimo porast temperature i vlažnosti u prostoriji zbog razloga što smo mjerenje obavili u neklimatiziranim uvjetima iz razloga kako ne bi bilo provjetravanja prostorije te s tim imali bi veće promjene u koncentraciji plinova u prostoriji pa su se zbog toga temperatura i vlažnost zraka u prostoriji povećavali. Također je bitno napomenuti kako je ispitivanje provedeno u +80 uzoraka zbog toga što smo čekali ponovno stabiliziranje koncentracije plinova u prostoriji. Sustav za provjetravanje je bio uklonjen od čitavog sustava da bi vidjeli čitav porast koncentracije plinova i prirodno stabiliziranje (smanjenje) koncentracije plinova u zraku.

Zatim je provedeno testiranje izlaganja butana senzoru pomoću upaljača kojeg smo držali oko 2 sekunde uključenog, grafički prikaz vrijednosti koncentracije plinova u zraku vidimo sljedećom slikom.



Slika 1.6. Grafički prikaz vrijednosti senzora na utjecaj butana

Sada vidimo još nagliji porast koncentracije plinova, a to je zbog veće količine plinova u našem slučaju butana. Vidimo nagli skok na oko 5000ppm te postepeni pad i stabiliziranje koncentracije plinova u zraku. Sustav je se sam stabilizirao bez korištenja ventilatora iz već pomenutih razloga. Također sustav je testiran u neklimatiziranim uvjetima kako bi dobili veće promjene u koncentraciji plinova u zraku te zbog toga vidimo postepeni porast temperature i vlažnosti u zraku.

5. Zaključak

Projekt sustava za mjerenje kvalitete zraka predstavljen u ovom dokumentu demonstrira uspješnu implementaciju hardverskog i programskog rješenja za praćenje ključnih parametara kvalitete zraka, kao što su temperatura, vlažnost, koncentracija plinova, atmosferski tlak i nadmorska visina. Ovaj sustav je značajan alat u kontekstu održivog razvoja i zaštite zdravlja ljudi, s obzirom na sve veću zabrinutost za kvalitetu zraka uslijed urbanizacije i industrijskog razvoja.

Kroz realizaciju projekta, korištene su razne komponente i alati, uključujući mikrokontroler ESP32, senzore DHT22, MQ135 i BMP180, te Adafruit IO web server za pohranu i prikaz podataka. Hardverski dio projekta uključuje detaljno povezivanje senzora i mikrokontrolera, dok je programsko rješenje fokusirano na prikupljanje podataka, njihovu obradu i slanje na web server.

Testiranje sustava je provedeno u različitim uvjetima kako bi se osigurala točnost i pouzdanost prikupljenih podataka. U klimatiziranoj prostoriji, rezultati su pokazali konstantne i točne vrijednosti za temperaturu i vlažnost, s minimalnim oscilacijama u koncentraciji plinova i atmosferskom tlaku, što može biti rezultat elektronskog šuma ili malih promjena u atmosferi. Kada je sustav testiran u zatvorenoj prostoriji bez klimatizacije, rezultati su pokazali veće oscilacije zbog prisutnosti ljudi i zatvorenih prozora, što je povećalo koncentraciju CO₂ i utjecalo na temperaturu i vlažnost zraka .

Na temelju prikupljenih podataka, sustav se pokazao vjerodostojnim, no identificirane su i mogućnosti za daljnja poboljšanja. To uključuje bolju kalibraciju senzora, smanjenje elektronskog šuma, te integraciju dodatnih senzora za mjerenje drugih zagađivača. Također, dugoročno testiranje u različitim uvjetima okoliša može pomoći u daljnjem poboljšanju pouzdanosti i točnosti sustava.

Ukupno gledajući, projekt predstavlja značajan korak prema razvoju pristupačnog i učinkovitog sustava za mjerenje kvalitete zraka. Kroz daljnja poboljšanja i testiranja, ovakav sustav može postati ključan alat za praćenje i poboljšanje kvalitete zraka, što je od izuzetne važnosti za javno zdravlje i okoliš.

Ovaj zaključak temelji se na detaljnoj analizi prikupljenih podataka i usporedbi s referentnim vrijednostima, čime se potvrđuje pouzdanost i funkcionalnost razvijenog sustava .