



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Rimas Volyniec

CO₂ JUTIKLIŲ METROLOGINIŲ CHARAKTERISTIKŲ TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Prof. dr. Darius Gailius

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

TVIRTINU

Katedros vedėjas
Prof. dr. Dangirutis Navikas

CO₂ JUTIKLIŲ METROLOGINIŲ CHARAKTERISTIKŲ TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Elektronikos inžinerija 621H61002

Vadovas

Prof. dr. Darius Gailius

Recenzentas

Doc. Dr. Žilvinas Nakutis

Projektą atliko

Rimas Volyniec

KAUNAS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos

(Fakultetas)

Rimas Volyniec

(Studento vardas, pavardė)

Elektronikos inžinerija, 621H61002

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „CO2 metrologinių charakteristikų tyrimas“

AKADEMINIO SAŽINGUMO DEKLARACIJA

20 ____ m. _____ d.

Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Rimo Volyniec** baigiamasis projektas tema „CO2 metrologinių charakteristikų tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(parašas)

Volyniec, R. *CO₂ metrologinių charakteristikų tyrimas.*

Elektronikos inžinerijos magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. Dr. Darius Gailius; Kauno Technologijos Universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, elektronikos katedra.

Studijų kryptis ir sritis: Elektronikos inžinerija, Technologiniai mokslai

Reikšminiai žodžiai: *anglies dioksidas, jutiklis, CO₂, NDIR, dreifas.*

Kaunas, 2016. 47 psl.

SANTRAUKA

Šio magistro baigiamojo projekto tikslas – ištirti anglies dioksido dujų koncentracijos jutiklio metrologines charakteristikas. Darbe tiriama CO₂ jutiklių ilgalaikis stabilumas ir matavimų dreifas.

Tyrimo procesą sudarė šie etapai: 1) Anglies dioksido ir absorbcijos reiškinio analizė; 2) Jutiklio konstrukcijos analizė ir tyrimas; 3) Pastovios CO₂ koncentracijos palaikymo šaltinio projektavimas ir konstrukcija.

Pirmoje dalyje apžvelgiamos CO₂ dujos, jų koncentracijos priklausomybė nuo atmosferinių parametų. Šioje dalyje aptariama dujų absorbcijos reiškinys ir jo panaudojimas matuojant dujų kieki.

Antroje dalyje išanalizuojama NDIR jutiklio konstrukcija, tiriama matavimų dreifo prigimtis ir įvairūs konstrukciniai sprendimai siekiantys sumažinti jutiklių dreifą. Tyrimas atliekamas naudojant „MATLAB“ programinį paketą.

Trečioje dalyje konstruojamas pastovios CO₂ koncentracijos palaikymo šaltinis. Proceso valdymui panaudojamas PID algoritmas.

Volyniec, R. *Research of metrological characteristics of CO₂ sensor*.

Final project of Electronics engineering master degree / supervisor prof. Dr. Darius Gailius; Kaunas University of technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Department of Electronics Engineering.

Study area and field: Electronics Engineering, Technological Sciences.

Key words: Carbon dioxide, sensor, CO₂, NDIR, drift.

Kaunas, 2016. 47 pages.

Summary

Main goal of this master final project is to investigate carbon dioxide concentration sensor metrological characteristics. In this project, sensor long time stability and measurement drift is studied.

The study consists of the following parts: 1) Carbon dioxide and infrared absorption analysis; 2) Sensor design analysis; 3) Fixed CO₂ concentration source design and construction.

First part provides an overview on CO₂ gas and the concentration dependence of atmospheric parameters. This section discusses gas absorption and its utilization of gas measurement.

In second part we analyze NDIR sensor design, study measurement drift nature and various solutions in order to reduce sensor drift. Study is conducted using „MATLAB "software.

In the third part, CO₂ constant concentration level source is being build. For process control PID algorithm is being used.

Turinys

1. Įvadas	7
2. Analitinė dalis	8
2.1. Anglies dioksidas	8
2.2. Dujų tūrio skaičiavimas	12
2.3. Infraraudonųjų spindulių absorbcija	14
2.4. NDIR CO ₂ jutiklio konstrukcija	17
2.4.1. Spindulių šaltinis.....	18
2.4.2. CO ₂ kamera.....	23
2.4.3. Filtras.....	23
2.4.4. Detektorius.....	23
2.4.5. Valdiklis	24
2.5. CO ₂ jutiklio panaudojimas patalpų vėdinimo valdyme	25
3. Tiriamoji dalis	26
3.1. NDIR CO ₂ jutiklių tipai.....	26
3.1.1. Vieno kanalo NDIR CO ₂ jutiklis.	26
3.1.2. Dviejų kanalų NDIR CO ₂ jutiklis.....	32
3.1.3. Dviejų kanalų NDIR CO ₂ jutiklis su dujų koncentracijos poslinkiu.	33
3.1.4. Dviejų kanalų NDIR CO ₂ jutiklis su absorbcijos kanalo poslinkiu.....	34
4. Eksperimentinė dalis	38
4.1. Cheminio proceso valdymas palaikant pastovią CO ₂ koncentraciją.	38
4.2. Pastovios koncentracijos CO ₂ šaltinis.....	40
5. Išvados.....	45
6. Literatūros sąrašas	46

1. Įvadas

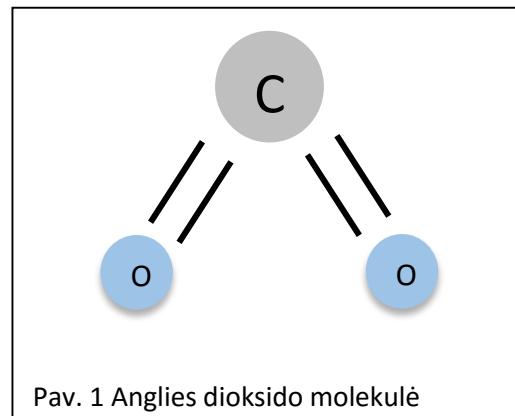
Anglies dioksidas yra viena iš dažniausiai sutinkamų dujų mūsų planetoje. Jos dalyvauja įvairuose cheminiuose procesuose, yra žmogaus kvėpavimo produktu. CO₂ matavimas gali būti reikalingas dėl įvairių priežasčių. Atsiranda reikalavimas tiksliai ir greitai pamatuoti šias dujas. Populiariausiu CO₂ dujų koncentracijos matavimo būdu yra infraraudonųjų spindulių absorbcijos matavimas taikomas NDIR jutikliuose. Tokie jutikliai gali tiksliai išmatuoti plataus diapazono koncentracijas, tačiau turi matavimų dreifo problema.

Šio darbo tikslai yra išanalizuoti NDIR CO₂ jutiklio konstrukciją ir ištirti matavimų stabilumą. Darbe siekiama įvertinti visų konstrukcijos elementų įtaką bendram prietaiso veikimui. Kitu darbo tikslu yra sukurti pastovios anglies dioksido koncentracijos palaikymo šaltinį, kuris bus naudojamas jutiklių stabilumo matavime ir prietaisų kalibravime.

2. Analitinė dalis

2.1. Anglies dioksidas

CO₂ tai neorganinės dujos susidedančios iš anglies ir dviejų deguonies atomų. Kambario temperatūroje tai bekvapės, bespalvės, nedegios dujos kurios gerai tirpsta vandenyje. Esant atmosferiniam slėgiui, temperatūrai nukritus žemiau -78^oC, šios dujos tampa kietu kūnu, praleidžiant skystio būseną.

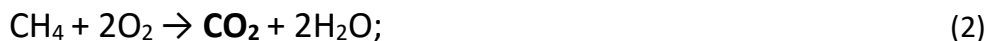


Anglies dioksidas yra kvėpavimo ir degimo procesų metu.

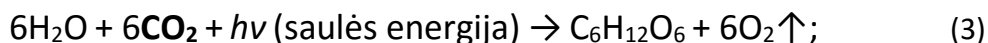


Gliukozės (C₆H₁₂O₆) oksidacijos reakcija bendrai priimama kaip ląstelinio kvėpavimo reakcija

Metano degimo reakcija:

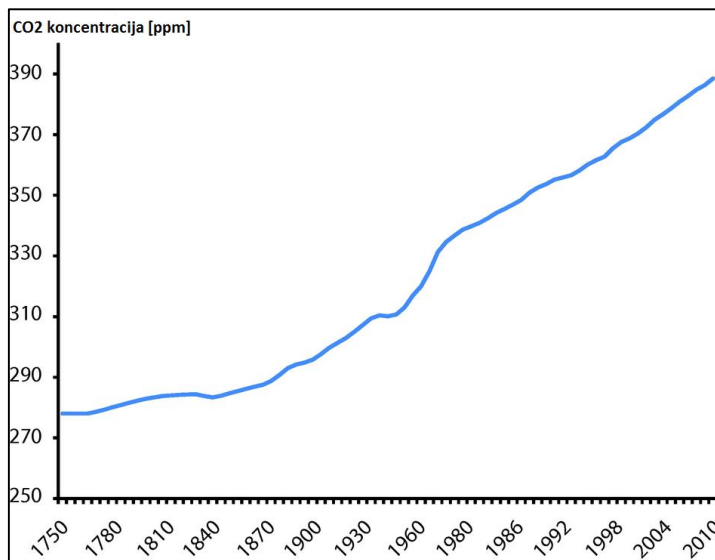


Anglies dioksido kiekį mažina fotosintezės procesas vykstantis augaluose.



Fotosintezės metu iš anglies dioksido gaunamas deguonis, kuris vėliau naudojamas kvėpavimo ir degimo procesuose.

Šie procesai reguliuoja anglies dioksido kiekį atmosferoje. CO₂ sudaro maždaug 0,04% atmosferos tūrio. Šis skaičius po truputį kinta, kasmet auga.



Pav. 2 CO₂ dujų atmosferoje vidutinės koncentracijos priklausomybė nuo laiko(metų).

Žmogus įkvepia orą, kurio sudėtyje yra anglies dioksido, todėl svarbu yra žinoti šių dujų poveikį organizmui. CO₂ koncentracija iki 0,08% yra tipinė vidaus patalpoms ir nesukelia jokių neigiamų poveikių. Iki 0,25% koncentracija dar toleruotina. Vidutinė 0,05% koncentracija yra ribinė 8 valandų poveikiui. Viršijus šią vertę ar išbūnant prie tokių sąlygų ilgesnį laiką, CO₂ gali turėti poveikį sveikatai. Trumpalaikės ekspozicijos į <3% taip pat neturi padarinių sveikatai. Aukštesnės koncentracijos gali sukelti galvos skausmą, padidėjusį kvėpavimo dažnį. Esant didelėms koncentracijoms atsiranda pykinimas, galimas sąmonės praradimas, mirtis. Žmogaus iškvepiamame ore yra maždaug 4%-5,3% anglies dioksido.

Matuojant CO₂ dujas, paprastai matuojama jų tūrio santykis su bendru oro tūriu ($\frac{V_{CO_2}}{V}$). Anglies dioksido matavimo prietaisai paprastai atlieka molekulių kiekio matavimą, todėl gautus duomenis reikia apdoroti ir apskaičiuoti CO₂ tūrį.

Anglies dioksidą patogiau analizuoti naudojant idealių dujų termodinamikos taisykles.

Clapeyrono lygtis tai pagrindinė lygtis naudojama idealių dujų aprašyme. Ji sieja dujų kiekį su jų tūriu:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T; \quad (4)$$

p - slėgis [Pa];

V - dujų tūris [m³];

n - dujų kiekis [mol];

R - universali dujų konstanta (8.3145 J/mol K);

T - temperatūra [K];

Atliekant CO₂ dujų analizę svarbu atsiminti kad dažniausiai jos sutinkamos dujų mišinyje (ore).

$$p \cdot V = (n_1 + n_2 + \dots + n_k) \cdot R \cdot T; \quad (5)$$

n_i - i dujų molių kiekis.

Dujų mišiniui aprašyti panaudojame Daltono dėsnį. Pagal jį, esant tam pačiam slėgiui, dujų mišinio užimamas tūris yra visų dujų užimamo tūrio suma.

$$V = \sum_{i=1}^k V_i; \quad (6)$$

Clapeyrono lygtį išreiškus dujų mišiniui gauname:

$$p \cdot \sum_{i=1}^k V_i = \sum_{i=1}^k n_i \cdot R \cdot T; \quad (7)$$

Iš lygties išreiškiame anglies dioksido tūrio priklausomybę nuo jo kiekio, temperatūros ir slėgio.

$$p \cdot V_{CO_2} = n_{CO_2} \cdot R \cdot T; \quad (8)$$

$$V_{CO_2} = \frac{R \cdot T \cdot n_{CO_2}}{p}; \quad (9)$$

CO₂ tūrį galime išreikšti tūrio, esant standartinėms sąlygoms, atžvilgiu:

$$V_{(T,p)} = \frac{T \cdot p_n}{p \cdot T_n} \cdot V(T_n, p_n) \quad (10)$$

T - oro temperatūra[K];

p - oro slėgis[HPa];

T_n -standartinė temperatūra (273,15K);

P_n -standartinis slėgis (1013hPa);

$V_{(T_n, p_n)}$ - dujų tūris esant standartinėms sąlygoms;

Oro slėgis paprastai išreiškiamas kompensavus jūros lygio atžvilgiu. Priklausomai nuo aukščio, slėgis kinta. Pvz.: Jei jūros lygyje slėgis yra 1013hPa tai 2000 metrų aukštyje jis yra 795hPa

$$p = p_0 e^{-\frac{\mu \cdot g \cdot h}{R \cdot T}};$$

p_0 - Slėgis jūros lygio aukštyje[Pa];

μ - oro molinė masė (0,0289644 kg/mol);

g - Laisvo kritimo pagreitis(9,81m/s²);

R - universali dujų konstanta (8.3145 J/mol K);

T - temperatūra [K];

Dėl tokio slėgio sąlygų kitimo, verta įvertinti įtaką kurią slėgis ir temperatūra daro anglies dioksido koncentracijai. Iš lentelės 1 matome kad jei slėgis buvo pamatuotas 0°C temperatūroje, esant 1013hPa oro slėgiui. Išmatuotas toks pats dujų kiekis bet esant jau kitokioms sąlygoms, tai yra esant -20°C temperatūrai it 800hPa slėgiui (~2000 metrų aukštis) turėtų reikšti visai kitokią, 15% mažesnę reikšmę. Norint gauti tikslius matavimus, temperatūra ir slėgis turėtų būti kompensuojami.

Lent. 1. CO₂ kiekio priklausomybė nuo temperatūros ir atmosferos slėgio.

p[hPa]\T[C]	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30
800	852	836	820	805	790	776	762	749	736	724	712
900	959	940	922	905	889	873	857	842	828	814	801
950	1012	992	974	955	938	921	905	889	874	859	845
1000	1065	1045	1025	1006	987	969	952	936	920	904	889
1013	1079	1058	1038	1019	1000	982	965	948	932	916	901
1050	1119	1097	1076	1056	1037	1018	1000	983	966	950	934
1100	1172	1149	1127	1106	1086	1066	1048	1029	1012	995	978

Anglies dioksido matavimai yra priklausomi nuo drėgmės kiekio ore. Vandens garai esantys ore, sukelia papildomą slėgį kurį reikia kompensuoti skaičiuojant CO₂ tūrį.

Drėgmės kiekis ore paprastai išreiškiamas santykinė drėgme:

$$F = \frac{e}{e_s} \cdot 100\%; \quad (11)$$

$e_s(T)$ - didžiausias vandens garų kiekis ore;

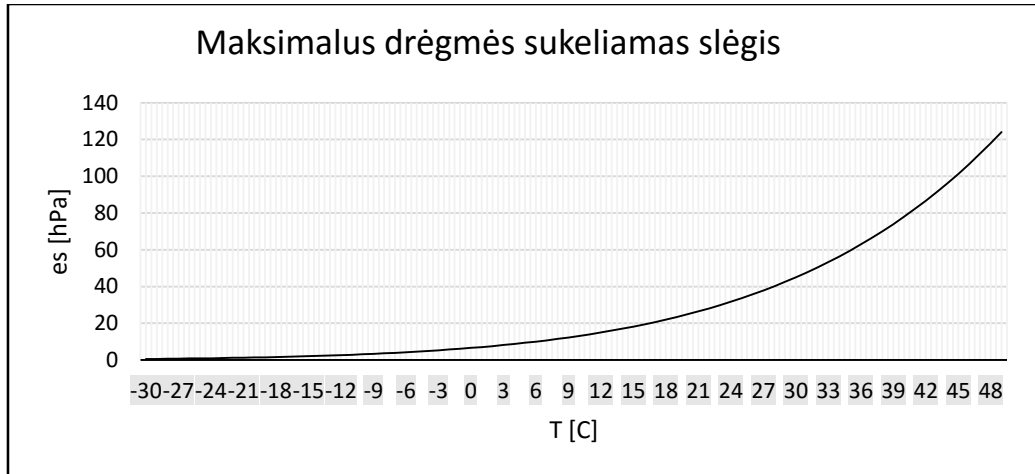
e - drėgmės kiekis ore;

F - santykinė drėgmė [%];

Santykinė drėgmė tai vandens garų kiekio ore santykis su didžiausiu vandens garų kiekiu esamomis sąlygomis. Ore esanti drėgmė sukelia slėgį. Jis yra tiesiškai proporcingas santykinėi oro drėgmei. Žinant maksimalų drėgmės sukeltą slėgį $e_s(T)$ bei santykinę drėgmę, galima apskaičiuoti vandens garų slėgį.

Maksimalus drėgmės slėgis išreiškiamas formule:

$$e_s(T) = 6,112 \cdot e^{\frac{17.67 \cdot T}{T+243.5}} hPa; \quad (12)$$



Pav. 3 Maksimalaus drėgmės sukeliamo slėgio priklausomybė nuo temperatūros

Iš pamatuoto atmosferinio slėgio reikia kompensuoti drėgmės sukeltą slėgį

$$p_{oro} = p - e; \quad (13)$$

$$p_{oro} = p - \frac{F \cdot e_s}{100\%} \quad (14)$$

Įvertinus vandens garų sukurtą slėgį, dujų tūris išreiškiamas formule:

$$V = \frac{n \cdot R \cdot T}{p - \frac{F \cdot e_s}{100\%}} \quad (15)$$

Konstruojant CO₂ jutiklius, gera mintis yra konstruoti bendrą oro sąlygų matavimo stotelę kurioje yra matuojama temperatūra, slėgis, drėgmė ir anglies dioksidas. Visi šie parametrai yra priklausomi nuo savęs.

2.2. Dujų tūrio skaičiavimas

Anglies dioksidas tai nėra idealios dujos, todėl norint tiksliau paskaičiuoti reikėtų naudoti Van Der Wallso lygtį:

$$\left(p + \frac{n^2 \cdot a}{V^2}\right) \cdot (V - n \cdot b) = n \cdot R \cdot T; \quad (16)$$

a ir b yra konstantos charakteringos kiekvienoms dujoms

$$a = 0,364 \text{ Pa} \cdot \text{m}^6 / \text{mol}^2;$$

$$b = 4,267 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{mol};$$

Norint paskaičiuoti dujų tūrį reikia išspręsti trečios eilės lygtį.

$$p \cdot V^3 - (n \cdot b \cdot p + n \cdot R \cdot T) \cdot V^2 + n^2 \cdot a \cdot V - n^3 \cdot a \cdot b = 0; \quad (17)$$

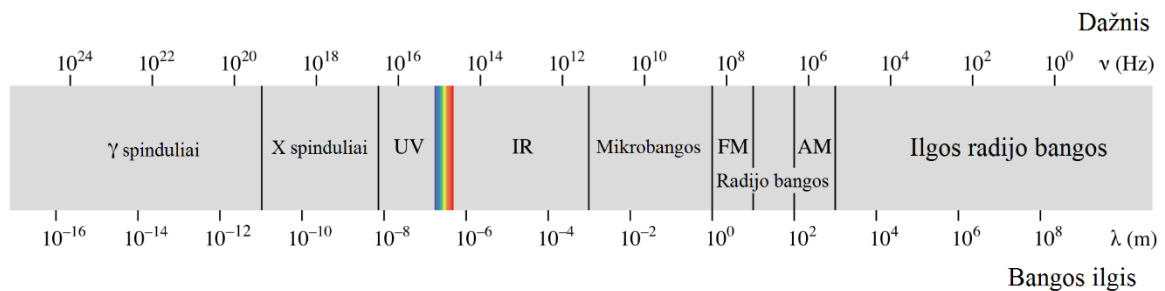
Ryškesni skaičiavimo rezultatų skirtumai tarp Clapeyrono ir Van Der Wallso lygčių pasireiškia prie aukštesnių nei atmosferinis slėgių (10000hPa ir daugiau).

Dėl pakankamo tikslumo ir skaičiavimo paprastumo, skaičiuojant oro parametrus, naudojame idealių dujų išraišką.

2.3. Infraraudonųjų spindulių absorbcija

Vienu iš populiariausių CO₂ matavimo būdų yra infraraudonųjų spindulių(IR) energijos absorbcija.

Infraraudonieji spinduliai tai elektromagnetinės bangos kurių ilgis yra nuo 780nm iki 1mm. Jas spinduliuoja visi kūnai kurių temperatūra viršija kelis Kelvinus. Toks reiškinys vadinamas šiluminiu spinduliavimu. Kambario temperatūroje dominuoja 10 μm bangos.



Pav. 4. Elektromagnetinių bangų spektras

IR spinduliavimas skirstoms į 3 sritis pagal bangų ilgį:

- Artimoji IR sritis (ang. *near infrared, NIR*), 0,8–2,5 μm;
- Vidutinė IR sritis (ang. *mid infrared, MIR*), 2,5–25 μm;
- Tolimoji IR sritis (ang. *far infrared, FIR*), 25–1000 μm.

Infraraudoniems spinduliams praeinant pro dujas, jų atomai gali sugerti dalį energijos. Dujų molekulės sugeria savo struktūrai specifinio dažnio spindulius. Energija paverčiama dalelių virpesiais. Absorbcijos spektre dominuoja bangų dažniai kurie sutampa su dalelių virpesių dažniais. Tada spinduliuojama energija sutampa su molekulės vibracijos energija.

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}; \quad (18)$$

E- Bangos kvanto energija;

λ- Bangos ilgis;

h- Planko konstanta;

c- Šviesos greitis;

$$\lambda = 4,3 \cdot 10^{-6} \text{m};$$

$$h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s};$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s};$$

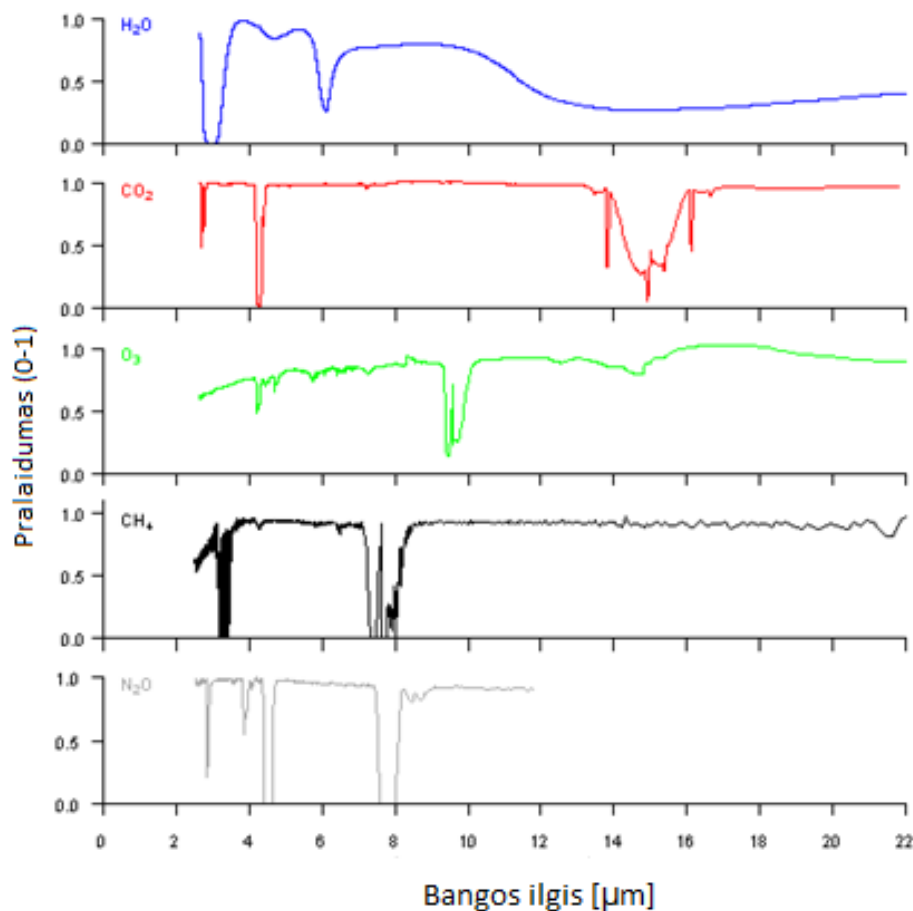
$$E = 4,6 \cdot 10^{-48} \text{ J};$$

CO₂ dujų absorbcijai gali būti naudojami 4,3 μm bangos ilgio infraraudonieji spinduliai.

IR spektroskopijoje, dėl patogumo, dažnai naudojama dydis vadinamas bangos skaičiumi. Tai yra bangos ilgio atvirkštumas. Jis paprastai išreiškiamas cm⁻¹.

$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} = 2,3 \cdot 10^5 \text{ m}^{-1} = 2300 \text{ cm}^{-1}; \quad (19)$$

Įvairios dujos turi skirtingus absorbcijos spektrus. Jie priklauso nuo molekulių atominių ryšių. Apšviečiant dujas pasirinkto ilgio spinduliuote, reikia atkreipti dėmesį į įvairių medžiagų absorbcijos dažnių koreliaciją. Ypač svarbu matuojant dujas kurios yra mišinyje (pvz.: CO₂ ore), kad kiti dujų mišinio komponentai neabsorbuotų tų pačių spindulių, kurie naudojami matuojant norimas dujas. Blogai parinkus spinduliuojamų bangų ilgį, jos gali būti absorbuojamos ne tik matuojamos medžiagos bet ir kitokių molekulių (pvz.: CO₂ ir H₂O spinduliuojant 15 μm bangomis). Tokiu atveju jutiklis gali parodyti neteisingus rezultatus.



Pav. 5 Įvairių dujų absorbcijos spektrai infraraudonųjų bangų diapazone [nuoroda. 23]

Infraraudonų spindulių srautas yra proporcingas dujų koncentracijai terpėje.

$$I = I_0 \cdot e^{k \cdot P}; \quad (20)$$

I_0 – Šviesos srautas esant 0 ppm (ang. parts per milion);

I – Šviesos srautas praėjęs pro dujas;

k – Sistemos konstanta;

P – CO₂ koncentracija.

2.4. NDIR CO₂ jutiklio konstrukcija

NDIR CO₂ jutiklis (ang. non dispersive infrared CO₂ sensor) tai nedispersinis infraraudonųjų spindulių anglies dioksido jutiklis. NDIR jutiklių tipas taikomas matuoti įvairių dujų koncentracijai duotoje terpėje. Šis matavimo būdas paremtas infraraudonųjų spindulių absorbcija. Dujos esančio matavimo kameroje yra apšvitinamos infraraudonaisiais spinduliais kurių bangos ilgis parenkamas taip kad spinduliai būtų absorbuojami matuojamų dujų. Spinduliai kurie nebuvo absorbuoti patenka į detektorius kur matuojamas jų intensyvumas. Gautas signalas yra apdorojamas ir perskaičiuojamas į matuojamų dujų koncentraciją.

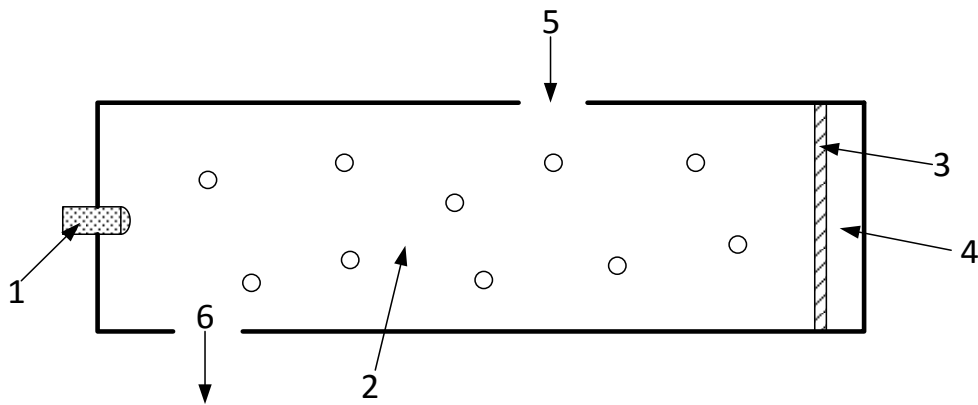
Toks matavimo principas remiasi Beero-Lamberto dėsniumi. Dujos absorbuoja joms specifinio dažnio bangas taip, kad spinduliuojamų bangų ir pro dujas praėjusių bangų intensyvumo santykis eksponentiškai priklauso nuo dujų koncentracijos ir sistemos konstantos.

$$I = I_0 \cdot e^{-kp};$$

Sistemos konstanta yra priklausoma nuo matuojamų dujų absorbcijos, švitinimui naudojamų bangų ilgio bei jutiklio konstrukcijos. Visi šie elementai konstruojame jutiklyje turėtų būti nekintantys. Matuojamų dujų absorbcija niekad nekinta, ji yra priklausoma tik nuo molekulinės struktūros. Matavimo bangos ilgis nekinta. Jis apibūdinamas šaltinio konstrukcijos ir panaudoto optinio bangų filtro. Pati jutiklio konstrukcija turi būti kiek įmanoma stabili, nekintanti.

Visos NDIR tipo jutiklių konstrukcijos turi bendrus pagrindinius elementus:

- Spindulių šaltinį;
- Matavimo kamerą;
- Spindulių filtrą;
- Detektorius;
- Valdymo elektroniką.



Pav. 6 Vieno kanalo NDIR jutiklio principinė schema

- 1- Kaitrinė lemputė;
- 2- CO₂ mėginio kamera;
- 3- Filtras;
- 4- Infraraudonųjų spindulių detektorius;
- 5- Mėginio įėjimas;
- 6- Mėginio išėjimas.

Visi šie elementai turi didelę įtaką jutiklio veikimui. Kiekvieno iš jų klaidingas veikimas įveda matuojamos dujų koncentracijos paklaidas.

2.4.1. Spindulių šaltinis

Šis elementas spinduliuoja bangas, kurios vėliau yra absorbuojamos. Visų pirmą, šaltinis turi sugebėti spinduliuoti reikiamo dažnio bangas. Svarbiausia šio elemento charakteristika yra spinduliuojamų bangų intensyvumas matuojamame diapazone. Anglies dioksido jutikliuose tai yra 4,3μm ilgio bangos. Šių bangų spinduliavimo intensyvumas turi būti kiek įmanoma pastovesnis. Šaltinis gali spinduliuoti kito dažnio bangas. Jos bus vėliau nufiltruojamos. Tokio sprendimo trūkumu yra švaistoma energija, nes iš viso spindulių spektro panaudojame tik siaurą juostą. NDIR jutikliuose spindulių šaltiniu gali būti panaudota Kaitrinė lemputė, specialus LED arba lazeris. Kaitrinė lemputė spinduliuoja plačiame spektre, o LED ir lazeris turi siaurą spinduliavimo juostą. Siaurajuosčiai šaltiniai turi būti pagaminti labai tiksliai ir nėra įmanoma juos pagaminti kad spinduliuotų kiekvieną mūsų norimą bangos ilgį. Šiuo metu NDIR jutikliuose jie naudojami daug rečiau nei kaitrinės lemputės. Didžiausia įtaką šiam faktui turi kainą. Ateityje šis faktas gali pasikeisti dėl pigančių LED ir kaitrinės lemputės trūkumų.

Kaitrinė lemputė

Populiariausiu infraraudonųjų spindulių šaltiniu NDIR CO₂ jutikliuose yra kaitrinė lemputė. Jos veikimo principas paremtas šiluminio spinduliavimo teorija. Emituojamas platus spektras spindulių, tarp kurių yra matuojamai medžiagai jautrūs spinduliai. Tokios lemputės veikimo principo paaiškinimui pasitelkiame juodojo kūno apibrėžimą. Absoliučiai juodas kūnas sugeria visą elektromagnetinį spinduliavimą iš aplinkos. Toks kūnas spinduliuoja elektromagnetines bangas, o spinduliuotės parametrai priklauso tik nuo kūno temperatūros. Spinduliavimo intensyvumas atitinkamame dažnyje apskaičiuojamas pasinaudojant Planko dėsniumi.

$$I(\lambda) = \frac{2 \cdot c^2 \cdot h}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1} \quad (21)$$

λ - Elektromagnetinės bangos ilgis;

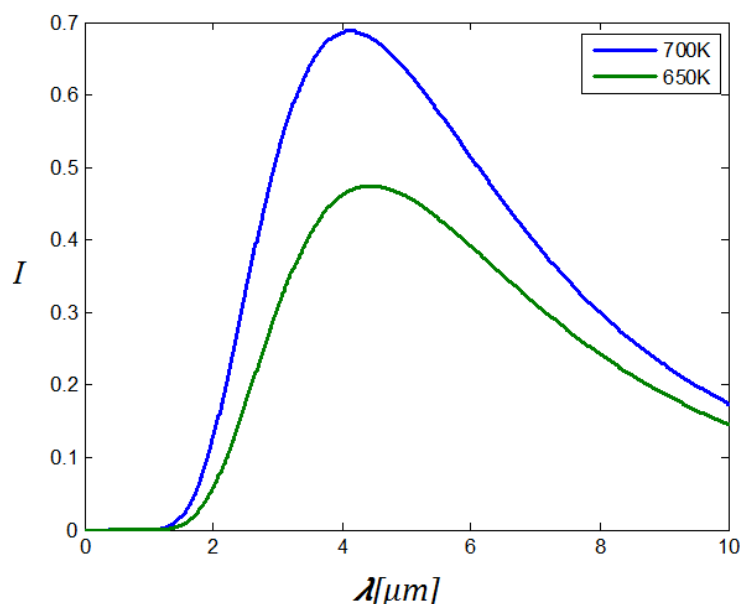
$I(\lambda)$ - λ ilgio bangų spinduliavimo intensyvumas išreikštas [$W \cdot m^{-3} \cdot sr^{-1}$];

c - Šviesos greitis ($3 \cdot 10^8$ m/s);

h - Planko konstanta ($6,62607004 \cdot 10^{-34}$ m²kg/s);

k - Bolcmano konstanta ($1,38064852(79) \cdot 10^{-23}$ J/K);

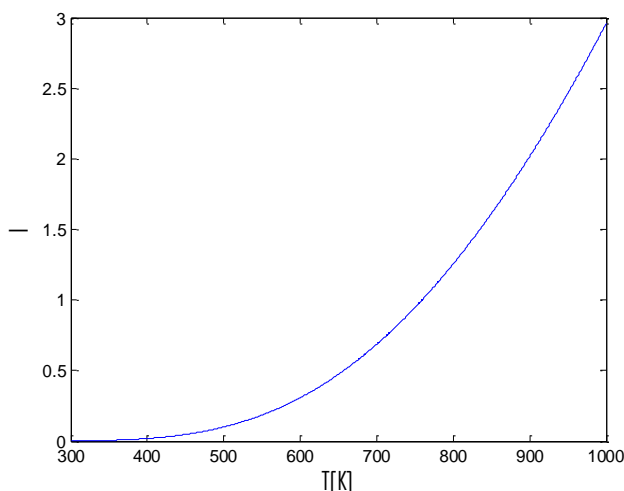
T - Kūno temperatūra išreikšta Kelvinais.



pav. 7 Absoliučiai juodo kūno spinduliuojamas spektras.

Paveiksle 7 matome absoliučiai juodo kūno spinduliavimo intensyvumo spektrą infraraudonųjų bangų diapazone. Spektras pristatomas esant dviem spinduliuojamo objekto temperatūroms.

Temperatūrai sumažėjus 50 K, pasikeičia spinduliuojamų bangų intensyvumas ir dažnis kuriame spektras yra maksimalus.



Pav. 8 Absoliučiai juodo kūno 4,3μm ilgio bangos spinduliuavimo intensyvumo priklausomybė nuo temperatūros.

Apšvietimui naudojamų lempučių kaitinamas elementas įkaista iki 2500K-3100K temperatūros. Tokiose sąlygose, didelė dalis energijos išspinduliuojama infraraudonųjų bangų srityje. Kaitrinė lemputė daugiau energijos išspinduliuoja IR bangomis nei matoma šviesa.

Lemputės naudojamos CO₂ matavimui dirba žemesnėje, maždaug 700K temperatūroje.

Iš paveikslo 7 ir 8 matome, kad net mažas lempučių kaitrinio elemento temperatūros pokytis daro didelę įtaką spindulių intensyvumui ties mus dominančiu bangų ilgiu. Temperatūrai pasikeitus iš 700K į 650K spindulių intensyvumas sumažėja 30%.

Lemputė nėra absoliučiai juodas kūnas. Pačio kaitinamo elemento spinduliuojamas spektras skiriasi nuo absoliučiai juodo kūno spinduliuojamo spektro. Dar didesne įtaka įvairaus ilgio bangų spinduliuotei turi lempučių stiklinis korpusas. Svarstant lempučių, įvertiname kad tai nėra absoliučiai juodas kūnas. Įvedame papildomą koeficientą kuris taip pat priklauso nuo bangos ilgio.

$$I(\lambda) = \varepsilon(\lambda) \cdot \frac{2 \cdot c^2 \cdot h}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1}; \quad (22)$$

Lemputės kaitrinio elemento temperatūra ir varža yra susiję. Kiekvieno laidininko varža priklauso nuo naudojamos medžiagos, temperatūros, skerspjūvio ploto ir ilgio.

$$R_0 = \rho \cdot \frac{l}{A}; \quad (23)$$

ρ - medžiagos savitoji elektrinė varža [$\Omega \cdot m$];

l - ilgis[m];

A -skerspjūvis[m²];

R_0 -Varža kai laidininko ir aplinkos temperatūrą yra panašios;

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T); \quad (24)$$

ΔT – Kūno ir aplinkos temperatūros skirtumas;

α - kūno temperatūrinis koeficientas;

R –įkaitinto kūno varža.

Iš lygčių 23 ir 24 matome kad varžos priklausomybę nuo skerspjūvio ir temperatūros. Šie parametrai gali keistis lemputės naudojimo metu.

Srovė tekanti pro lemputę sukelia elemento šildymą. Dalis šilumos yra išspinduliuojama elektromagnetinių bangų pavidalu. Kita dalis padidina kaitinamo elemento temperatūrą. Temperatūrą iki kurios įkaitinamas elementas galime apibrėžti formule:

$$P = k \cdot T; \quad (25)$$

P - lemputės naudojama galia;

k - temperatūros perdavimo koeficientas;

T - temperatūra, aplinkos atžvilgiu[K].

Performuojame išraišką įvesdami įtampą ir varžą:

$$\frac{U^2}{R} = k \cdot T;$$
$$U^2 = k \cdot T \cdot R; \quad (26)$$

U - įtampa paduodama kaitinamui elementui;

R - kaitinamo elemento varža.

Iš išraiškos (26) matome kad jei įtampa yra nekintanti tai varžos ir temperatūros sandauga taip pat yra pastovi. Padidėjus elemento varžai, sumažės temperatūra iki kurios jis įkaitinamas. Varžos pokytis kaitrinėje lemputėje vyksta dėl kaitinamo elemento garavimo. Laikui bėgant sumažėja šio elemento skerspjūvis. Dėl to padidėja varža ir sumažėja temperatūra iki kurios yra įkaitinamas

elementas. Tokiu atveju keičiasi spinduliuojamų bangų intensyvumas. Taip pat pasislenka bangos ilgis kurioje spinduliuotė yra didžiausia. Toks poslinkis apibrėžiamas vyno dėsnio.

$$\lambda_{max} = \frac{2897}{T}; \quad (27)$$

Lemputės naudojamos CO₂ matavimuose spinduliuoja bangas visame spektre todėl į detektorių patenkantys spinduliai turi būti filtruojami, kad gauti tik siaurą bangų ilgio juostą kurioje vyksta CO₂ absorbcija.

Kaitrinės lempučių trūkumais yra silpstantis intensyvumas, didelis energijos suvartojimas, spinduliuavimas plačiame spektre, šiluminis efektas, ilgas įšilimo laikas bei dideli gabaritai.

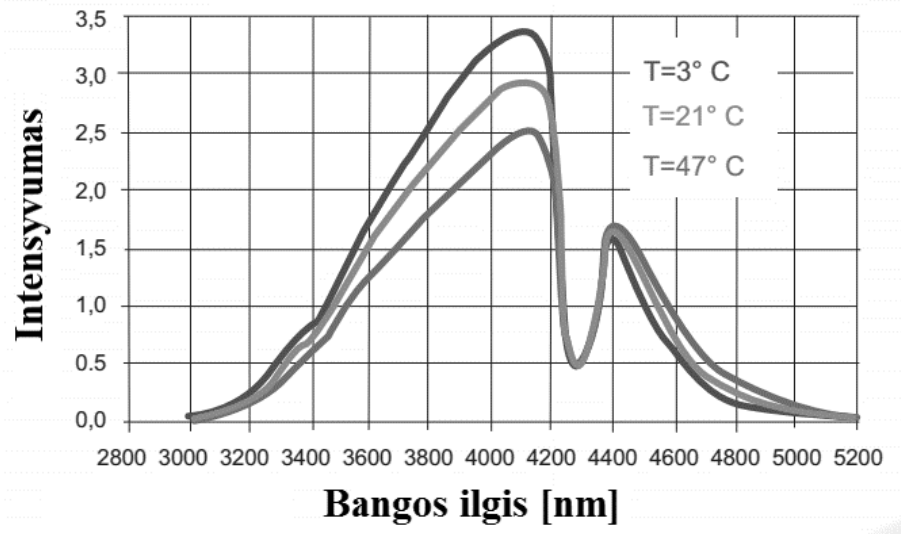
Kaitrinės lempučių didžiausiu privalumu yra nedidelė kaina.

Nors lempučių spinduliuotės intensyvumo pokytis yra didžiausiu NDIR jutiklių paklaidų šaltiniu, lempučių nėra atsisakoma, o problema bandoma spręsti kitokiais konstrukciniais sprendimais.

IR Diodas

Naujuose NDIR CO₂ jutikliuose, kartais, vietoje kaitrinės lempučių naudojamas diodas (IRED) kuris spinduliuoja bangas infraraudonųjų bangų diapazone. Anglies dioksido jutikliams naudojami diodai kurie yra suderinti 4200 nm bangos ilgio spinduliuotei. Toks diodas susideda iš heterodarinių užaugintų ant GaSb substrato. Diodų panaudojimas CO₂ matavimui turi daug privalumų. Diodas spinduliuoja bangas siaurame spektre. Dėl to sumažėja filtro svarba, energija nėra švaistoma. Stabiliam diodas veikimui nereikia laiko įšilti, jis gali veikti greičiau, yra mažesnis. Laikui bėgant nepasislenka jo spinduliuojamų bangų spektras. Diodų, kurie spinduliuotų IR bangas šiame diapazone gamyba yra sudėtinga. Dėl to, jų kaina yra žymiai didesnė nei kaitrinės lempučių. Dėl šių priežasčių diodai NDIR CO₂ jutikliuose yra naudojami rečiau nei kaitrinės lempučių. IRED spindulių intensyvumas mažėja bėgant laikui, todėl jutiklį reikia periodiškai kalibruoti arba pritaikyti konstrukcinius sprendimus kurie leistų įvertinti jutiklio dreifą.

IR LED spektras esant įvairioms temperatūroms



Pav. 9 pavyzdinio IR diodo spinduliuojamų bangų spektras.

2.4.2. CO2 kamera

Kamera, į kurią patenka matuojamos dujos. Kamera reikalinga, norint sukurti pastovias, nekintančias sąlygas matavimui ir atsiriboti nuo išorinių poveikių (pvz., saulės). Kamera turi angas pro kurias dujos gali patekti į ir iš kameros.

2.4.3. Filtras

Optinis filtras skirtas praleisti tik nustatyto ilgio infraraudonuosius spindulius. Filtras parenkamas taip kad praleistų tik to ilgio bangas, kurias absorbuoja matuojama medžiaga. Visos kitos bangos sudaro triukšmą ir mažina absorbcijos įtaką intensyvumui. Iš panaudoto filtro tipo kyla jutiklio pavadinimas. Filtras nesukelia spindulių dispersijos. Tokio tipo daugiasluoksnis filtras nesukeliantis dispersijos maždaug 1000 kartų geriau filtruoja bangas nei dispersiniai filtrai. Dėl šios priežasties NDIR tipo jutikliai yra daug populiareni nei dispersiniai infraraudonųjų spindulių jutikliai. Tokio tipo filtrų charakteristikos gali skirtis priklausomai nuo filtruojamų bangų dažnio. Šis faktas ypatingai svarbus konstruojant dviejų kanalų jutiklį kuriame kiekvienas kanalas veikia kitame bangos ilgyje.

2.4.4. Detektorius

Detektorius naudojamas NDIR CO₂ jutikliuose priima infraraudonuosius spindulius ir paverčia juos į elektrinę charakteristiką.

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}; \quad (28)$$

Toks detektorius turi būti jautrus energijai. Tai gali būti:

- Termo detektorius;
- Foto detektorius.

Termo detektorius paverčia elektromagnetinius spindulius į šilumą. Toks detektorius reaguoja į plataus spektro spinduliuotę. Dėl to kad detektorius nėra selektyvus, prieš jį turi būti filtras kuris nufiltruoja nereikalingas bangas. Termo detektoriai turi ilgą reakcijos laiką ir ribotą jautrumą.

Foto detektoriai tai rezistyvinio tipo jutikliai. Apšvitinus, jų varža sumažėja. Šie detektoriai yra selektyvūs. Jie reaguoja tik į riboto diapazono spektrą. Dauguma tokio tipo detektorių turi būti šaldoma kad veiktų teisingai. Tokia operacija yra sunkiai įgyvendinama kompaktiškuose jutikliuose todėl juose gali būti taikomi tie foto detektoriai kurie veikia teisingai dirbdami kambario temperatūroje. NDIR CO₂ jutikliuose tinka naudoti PbSe tipo foto detektoriai. Pagrindiniais jų privalumais yra didelis jautrumas, greitaveika ir galimybė dirbti kambario temperatūroje(20°C) Didžiausi trūkumai tai priklausomybė nuo temperatūros ir didesnė nei termo jutiklių kaina. Tokio tipo jutikliai sugeba matuoti 2-5 μm bangas. Toks diapazonas pilnai atitinka CO₂ jutikliams kurie absorbuoja 4,3 μm bangas. Nors jutiklis yra selektyvus bangų ilgiui, naudojant jį su kaitrine lempute, būtinas spinduliuotės filtravimas.

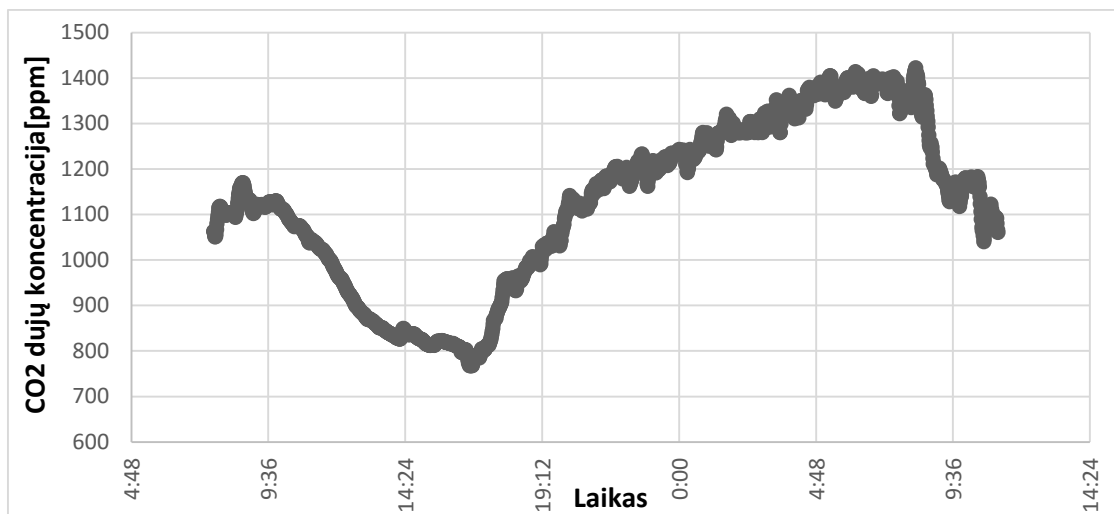
2.4.5.Valdiklis

Mikrokontroleris kuris valdo visą matavimo procesą, apdoroja signalą gautą iš detektoriaus. Matavimo rezultatus paverčia į CO₂ koncentraciją kuri dažniausiai išreiškiama ppm (ang. *parts per million*, liet. milijoninė dalis). Duomenis perduoda išoriniams įrenginiams.

2.5. CO₂ jutiklio panaudojimas patalpų vėdinimo valdyme

Kaskart populiariesniu CO₂ jutiklių panaudojimu yra patalpų vėdinimo valdymo sistemos. Tokie jutikliai diegiami ŠVAK sistemose. Nors blogas oras patalpose ne visada reiškia paaugusią CO₂ koncentraciją, bet šie faktoriai stipriai koreliuoja. Anglies dioksidą išpučia žmogus, todėl pakankamai tiksliai galima įvertinti žmonių buvimą patalpose ir jų fizinį aktyvumą. Įvertinus CO₂ kiekį galime įjungti/išjungti ventiliatorius. Toks vėdinimo valdymas leidžia tikslingai junginėti ventiliatorius, taupyti elektros energiją ir padidinti komfortą patalpose.

Pav. 17 matome CO₂ koncentraciją patalpoje kurioje nėra aktyvaus vėdinimo. Aiškiai matosi anglies dioksido koncentracijos kylimas maždaug nuo 17:00 valandos kada patalpoje atsiranda žmogus. Koncentracija kyla iki 7:00 valandos kada patalpa tampa tuščia. Toks ciklas atsikartoja. Bandyto metu patalpoje būdavo tik vienas žmogus, o CO₂ koncentracija svyruoja nuo 700ppm iki 1500ppm. Kambaryje jautėsi oro kokybės pablogėjimas kai anglies dioksido kiekis buvo aukštas.



Pav. 10 Silpnai vėdinamo kambario CO₂ koncentracija paros metu.

Norint valdyti vėdinimo sistemas pritaikant CO₂ jutiklius galime naudoti pigesnius vieno kanalo jutiklius. Tokiose sistemose periodiškai atsiranda šviežias oras todėl jutikliai patys kalibruojasi naudojant automatinį fono kalibravimo algoritmą. Matavimo tikslumui nėra keliami aukšti reikalavimai. Tokiose sistemose yra svarbu kad jutikliai ilgaamžiški ir nereikalaujant periodinio aptarnavimo. Dažnai tokie jutikliai integruojami į oro parametrų matavimo stotelę. Tokia stotelė matuoja temperatūrą, oro drėgnumą, CO₂ kiekį ir oro slėgį. Šie parametrai leidžia tinkamai įvertinti patalpos oro sąlygas ir jas reguliuoti.

3. Tiriamoji dalis

Ankstesnėje dalyje buvo pristatytas NDIR CO₂ jutiklis, aptarti jo pagrindiniai elementai, nustatyta pagrindinis trūkumas- jutiklio matavimų dreifas.

Šioje dalyje pristatoma įvairios jutiklių konstrukcijos ir tiriama matavimų dreifo fizikiniai principai ir konstrukcijų ypatumai leidžiantys kompensuoti šį reiškinį.

3.1. NDIR CO₂ jutiklių tipai

NDIR jutiklius pagal konstrukcijas galime išskirstyti į kelias rūšis. Įvairus šių jutiklių tipai tai skirtingos konstrukcijos sukurtos spręsti tą pačią NDIR jutiklių problemą - matavimų dreifą.

Pagrindiniu jutiklio tipu yra vieno kanalo NDIR jutiklis. Visi kiti tipai yra šio jutiklio modifikacijos, išplėtimai.

3.1.1. Vieno kanalo NDIR CO₂ jutiklis.

Tai paprasčiausias NDIR CO₂ jutiklio tipas. Kamera (Pav. 10 - 2) į kuria patenka dujų mišinys yra apšvitinama naudojant kaitrinę lemputę (Pav. 10 - 1). Kaitinamas elementas spinduliuoja elektromagnetines bangas plačiame spektre. Didžiausias emituojamų bangų intensyvumas yra infraraudonųjų spindulių srityje kurioje vyksta CO₂ dujų absorbcija. 4,3μm bangos ilgio spinduliai yra sugeriami CO₂ dujų. Nesugerti spinduliai yra filtruojami (Pav. 10 - 3) kad į detektorius (Pav. 10 - 4) patektų tik bangos kurių intensyvumas priklauso nuo CO₂ koncentracijos. Detektorius pakeičia spindulių intensyvumą į elektrinį parametą kuris yra elektroninių prietaisų apdorojamas.

CO₂ kameros apšvitinimas vyksta impulsais. Tai vykdoma kad įvertinti ir kompensuoti fono spinduliavimą, sumažinti elektros energijos sunaudojimą, neperkaitinti jutiklio elementų. Jei kameros švitinimas būtų nuolatinis, termo detektorius veiktų neteisingai. Jutiklyje su termo detektoriumi impulsų dažnis yra 1-3Hz. Naudojant fotodetektorius, geresnis matavimo tikslumas pasiekiamas naudojant didesnę impulsų dažnį, tačiau paprasta lemputė nesugeba greitai pulsuoti švitinimo. Tokiu atveju naudojamas IRED spindulių šaltinis arba atliekamas mechaninis lemputės spinduliuotės pridengimas. Pridenginėjimo sprendime atsiranda judanti mechaninė dalis, kuri ženkliai sumažina jutiklio ilgaamžiškumą.

Ši konstrukcija yra paprasta ir palyginus su kitomis NDIR jutiklių konstrukcijomis, pigi.

Didžiausiu konstrukcijos trūkumu yra dreifas susidarantis dėl konstrukcijos elementų parametru pokyčio. Teisingai sukonstruotas tokio tipo jutiklis neturi proporcinės paklaidos tik visame diapazone vienodą matuojamų rezultatų dreifą. Tai susiję su matavimo fizikiniu principu kuris paremtas Beero-Lamberto dėsnio

$$I = I_0 \cdot e^{-kp};$$

I - Spindulių, kurie patenka į detektorius, intensyvumas;

I_0 - Šaltinio emituojamų spindulių intensyvumas;

k - Sistemos koeficientas;

p - CO_2 koncentracija.

Jutiklio matavimų dreifą gali sukelti spindulių šaltinio parametru pasikeitimas. Šaltinio emituojamų spindulių intensyvumas laikui bėgant keičiasi. Tokiu atveju pasikeičia į detektorius krentančių spindulių intensyvumas, o valdiklis blogai dekoduoja koncentraciją.

Svarstome variantą kuriame matavimai atliekamas esant dviem skirtingam šaltinio spindulių intensyvumams I_0 ir I_1 . Priimkime kad pirmo matavimo metu matuojama p_0 koncentracija į kurią sistema reaguoja praleisdama I spindulių intensyvumą. Kitas matavimas atliekamas esant I_1 šaltinio intensyvumui, o matuojama koncentracija p_1 spindulius absorbuoja iki tokio pačio lygio I .

$$I = I_0 \cdot e^{-kp_0};$$

$$I = I_1 \cdot e^{-kp_1};$$

Pabandykime sulyginti abi lygtis kad įvertinti šaltinio spindulių intensyvumo pokyčio įtaką dekoduojamai koncentracijai.

$$I_0 \cdot e^{-kp_0} = I_1 \cdot e^{-kp_1};$$

$$\frac{I_0}{I_1} = \frac{e^{-kp_1}}{e^{-kp_0}};$$

$$\ln\left(\frac{I_0}{I_1}\right) = \ln\left(\frac{e^{-kp_1}}{e^{-kp_0}}\right);$$

$$\ln\left(\frac{I_0}{I_1}\right) = \ln(e^{-kp_1}) - \ln(e^{-kp_0});$$

$$\ln\left(\frac{I_0}{I_1}\right) = \ln(e^{-kp_1}) - \ln(e^{-kp_0});$$

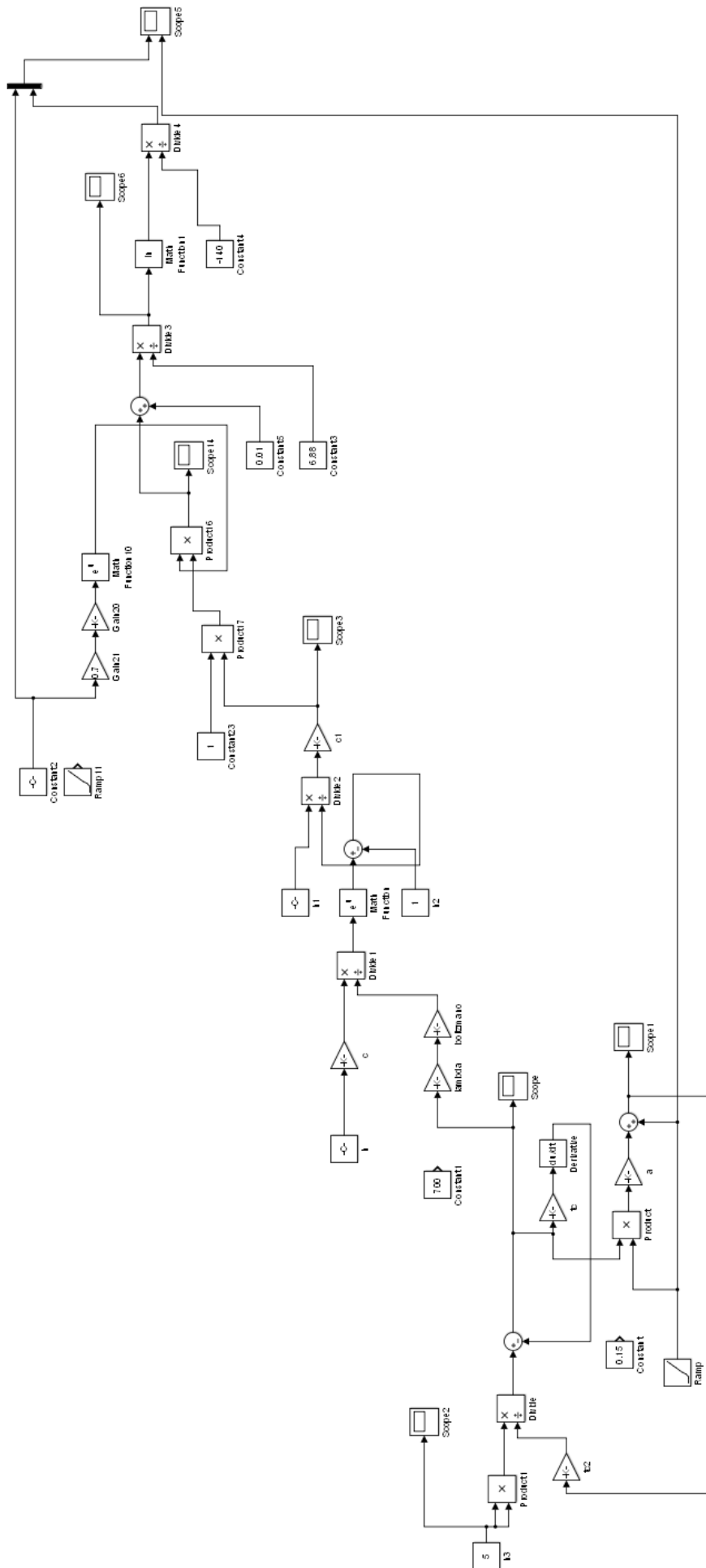
$$\ln\left(\frac{I_0}{I_1}\right) = -kp_1 + kp_0;$$

$$\frac{\ln\left(\frac{I_0}{I_1}\right)}{k} = p_0 - p_1; \quad (29)$$

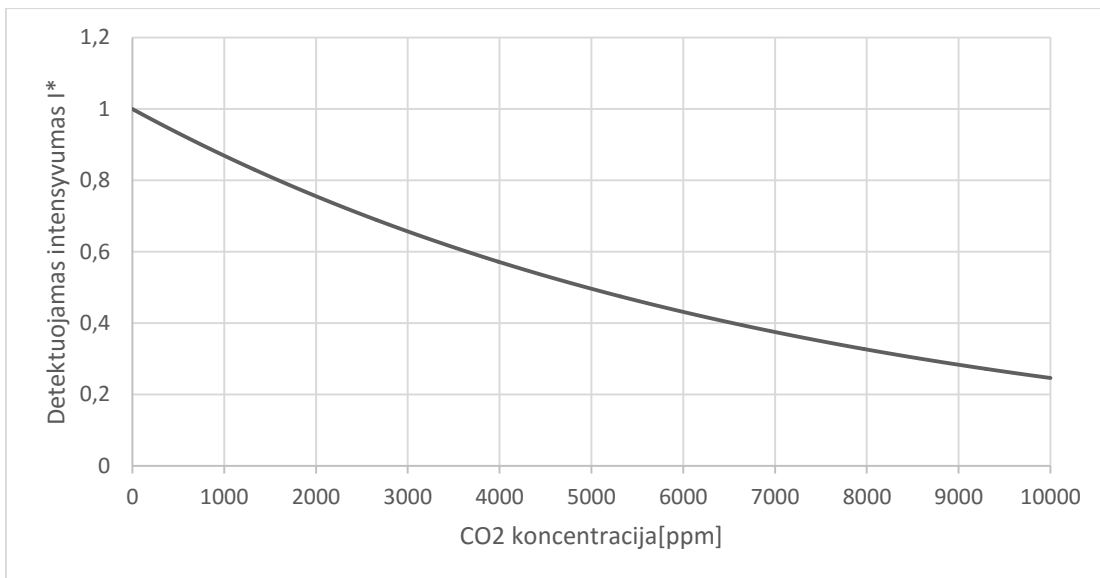
Šaltinio spindulių intensyvumo pokytis išreikštas santykiu $\frac{I_0}{I_1}$ sukelia poslinkį matuojamos vertės dekodavimo pokytį. Susilpnėjusį spindulių šaltinį sistema atpažįsta kaip didesnės koncentracijos matavimą. Dekoduojama koncentracija turi poslinkį kuris proporcingas šaltinio spindulių santykiui $\frac{I_0}{I_1}$. Poslinkis vienodas visam matavimo diapazonui.

Šis reiškinys parodo didžiausią vieno kanalo NDIR jutiklių trūkumą: matavimo rezultatų dreifą. Dėl šios priežasties, tokie jutikliai turi būti pastoviai kalibruojami.

Vieno kanalo NDIR CO₂ jutiklio veikimo įvertinimui atliktas jo modeliavimas. Sumodeliuota kaitrinė lemputė kuri įkaista iki 700K. Spindulių intensyvumo modeliavimui panaudotas absoliučiai juodo kūno modelis. Supaprastinimui priimta kad jutiklio filtras idealus. Modeliuojant bandoma įvertinti lempos varžos pokyčio įtaka spinduliuojamų bangų intensyvumui ir matavimo poslinkiui.

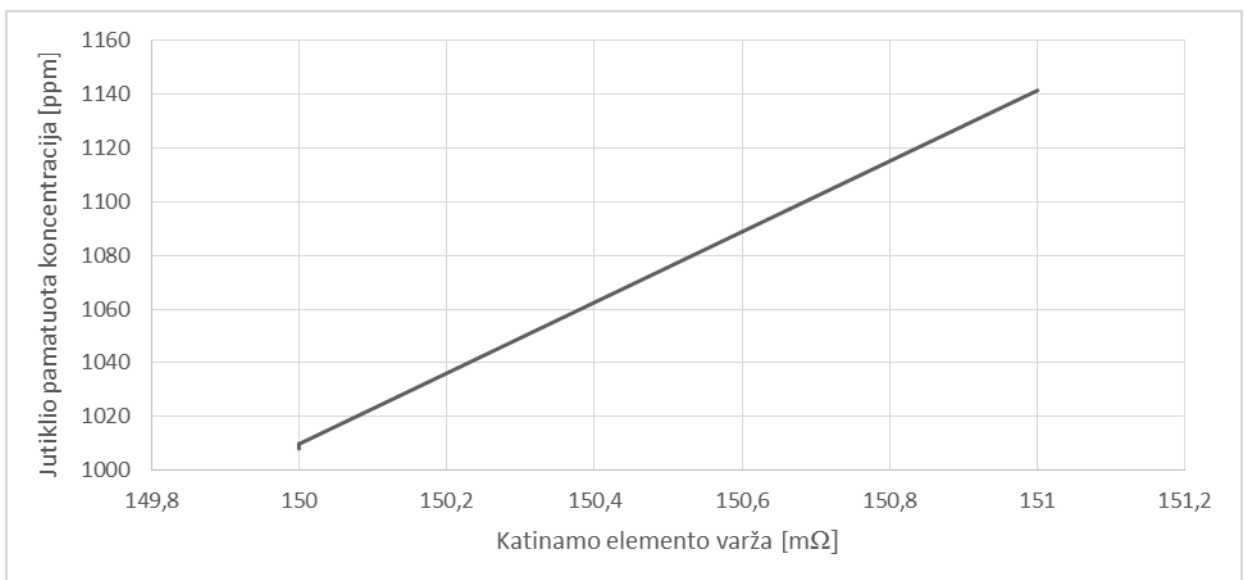


Pav. 11 Vieno kanalo NDIR CO₂ jutiklio modelis



Pav. 12 Sumodeliuoto NDIR CO₂ jutiklio spindulių patenkančių į detektorių intensyvumo (apatinis vaizdas) priklausomybė nuo anglies dioksido koncentracijos kameroje (viršutinis vaizdas).

Paveiksle 12 matome eksponentiškai silpstantį spindulių intensyvumą didėjant anglies dioksido koncentracijai. Ši priklausomybė apibrėžia NDIR jutiklius. Kai sistemoje nėra dujų kurios absorbuotų spindulius, detektuojamas intensyvumas yra artimas šaltinio spinduliuojamam intensyvumui.. Sistema gali būti suderinta įvairių koncentracijų dujų matavimams. Norint pasiekti didesnę tikslumą ir mažesnę diapazoną naudojama ilgesnė matavimo kamera. Siekiant išmatuoti didesnes koncentracijas kamera trumpinama.



Pav. 13 Sumodeliuoto NDIR CO₂ jutiklio matuojamos koncentracijos priklausomybė nuo kaitinamo elemento varžos.

Paveiksle 13 matome NDIR CO₂ jutiklio modeliavimo rezultatus. Sumodeliuotas jutiklis buvo suderintas kai kaitinamo elemento varža buvo 0,15 omų. Naudojimo metu elemento varža didėja dėl volframo išgarinimo (pav. 13). Paveikslėlyje matome matuojamos koncentracijos pokytį. Reali koncentracija yra 1000 ppm, tačiau jutiklis dėl kaitinamo elemento varžos pokyčio matuoja neteisingai. Varžai pasikeitus 0,67% matuojama koncentracija pasislinko 130 ppm. Pokytis yra vienodas visoms matuojamoms koncentracijoms.

Toks jutiklis turi būti periodiškai kalibruojamas siekiant kompensuoti elementų senėjimo įtaką.

Jutiklių kalibravimui naudojami:

- Šviežias oras kuriame yra apie 400ppm CO₂ dujų;
- Kitos dujos kurios visiškai išstumia CO₂ iš jutiklio. Tokiu atveju kalibruodami priimame kad CO₂ koncentracija lygi 0ppm;
- Automatinis fono kalibravimo algoritmas- tai algoritmas kuris nuolat seką žemiausią jutiklio užregistruotą koncentraciją. Šis algoritmas kas kelias dienas įveda matavimo pataisą priimdamas kad žemiausia užregistruota anglies dioksido koncentracija turėtų būti 400 ppm. Tokie algoritmai paprastai turi ribojimus kad per vieną kalibravimo periodą įvedama paklaida neviršytų 20-40 ppm. Šis algoritmas veikia teisingai tik tuo atveju kai į jutiklį periodiškai patenka šviežias oras. Specifinėse sąlygose, kai dujų koncentracija visada daugiau nei 400 ppm algoritmas turėtų būti išjungtas.

Tokio tipo jutikliai naudojami kai reikia pigaus sprendimo, o tikslumas nėra kritiškai svarbus. Kad užtikrinti šio tipo jutiklio matavimų tikslumą į jį periodiškai turi patekti šviežias oras (su 400ppm CO₂) arba jutiklis turi būti periodiškai rankiniu būdu (panaudojant šviežią orą arba atitinkamas dujas) kalibruojamas.

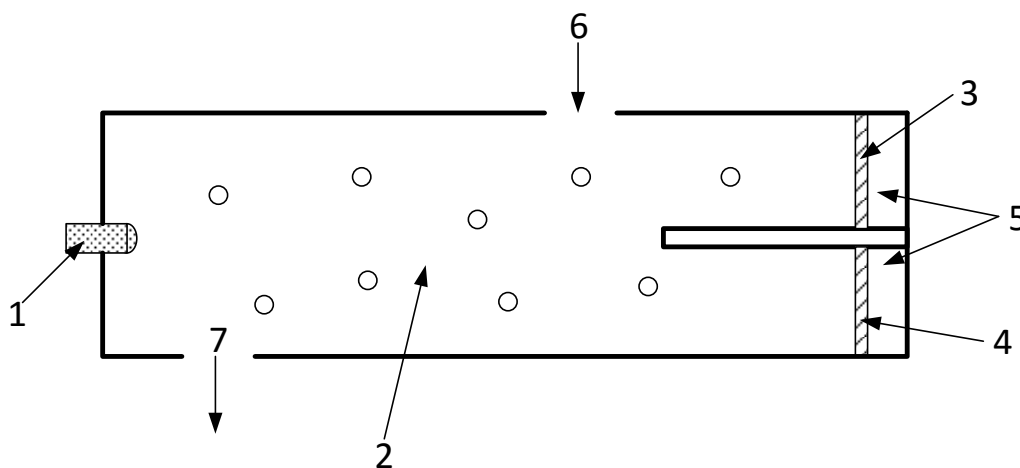
Jutiklio CO₂ kamera gali būti švitinama infraraudonais spinduliais ne dažniau kaip 3Hz dažniu. Šį dažnį riboja kaitinamo elemento pereinamasis procesas ir termo detektoriaus greitaveika. Jutiklis veikia impulsų režimu dėl elektros energijos taupymo bei infraraudonųjų spindulių fono kompensavimo.

3.1.2. Dviejų kanalų NDIR CO₂ jutiklis.

Siekiant kompensuoti NDIR jutiklio matavimų dreifą konstruojamas dviejų kanalų jutiklis su skirtingais filtrais. Tokiame jutiklyje yra matavimo kanalas ir atraminis kanalas. Pirmas yra toks pats kaip vieno kanalo jutiklyje, jo filtras sukonstruotas taip kad praleistų 4,3 μ m bangos ilgio spindulius kurie yra absorbuojami CO₂ dujų. Atraminis kanalas turi filtrą kuris konstruojamas praleisti bangas kurių ilgis paslinktas šiek tiek nuo 4,3 μ m, o spinduliai nėra absorbuojami CO₂ ar kitų dujų. Toks kanalas naudojamas spindulių šaltinio, kameros ir detektoriaus parametrų pokyčiams įvertinti.

Tokio tipo jutiklyje dreifo problema yra dalinai išspręsta. Matavimo kanalas ir atraminis kanalas yra taip pat paveikiami sistemos pokyčių. Ši konstrukcija turi trūkumą. Atraminio kanalo filtras suderintas kitokio ilgio bangoms nei matavimo kanalo filtras. Viena iš matavimo dreifo priežasčių yra šaltinio parametrų pokytis. Šaltinio parametrams keičiantis pasikeičia spinduliuojamų bangų spektras. Pokytis nėra tolygus įvairaus ilgio bangų spinduliuotės intensyvumui. Dėl šios priežasties jutiklis turės dreifą, nors jis bus žymiai mažesnis nei vieno kanalo jutiklyje.

Kiti šio tipo jutiklio trūkumai yra išaugusi kaina ir sudėtingesnė konstrukcija ir skirtingų filtrų panaudojimas.



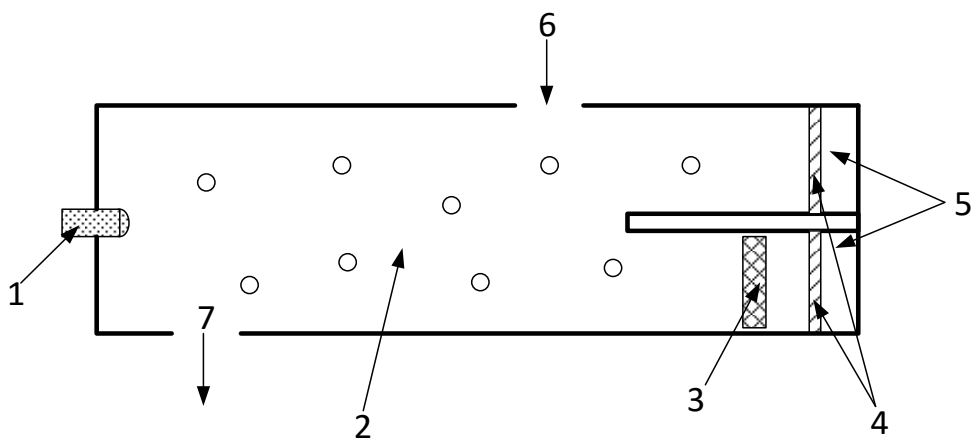
Pav. 14 Dviejų kanalų NDIR jutiklio principinė schema

- 1- Kaitrinė lempuotė;
- 2- CO₂ mėginio kamera;
- 3- 4,3 μ m bangos ilgio spindulių filtras;
- 4- Atraminio signalo filtras;
- 5- Infraraudonųjų spindulių detektorius;
- 6- Mėginio įėjimas;

7- Mėginio išėjimas.

3.1.3. Dviejų kanalų NDIR CO₂ jutiklis su dujų koncentracijos poslinkiu.

Šios konstrukcijos jutiklis primena paprastą dviejų kanalų NDIR CO₂ jutiklį. Šis jutiklis papildomai turi kamerą kurioje yra patalpina žinomos koncentracijos CO₂ dujos kurios perstumia vieno kanalo matavimo tašką. Šios konstrukcijos jutiklyje abu infraraudonųjų spindulių filtrai yra sukonstruoti praleisti 4,3μm ilgio bangas. Ši konstrukcija yra sudėtingesnė todėl ji naudojama retai. Ji dažniau aprašoma teoriniuose svarstymuose nei panaudojama realiuose jutikliuose.



Pav. 15 Dviejų kanalų NDIR jutiklio su dujų koncentracijos poslinkiu principinė schema.

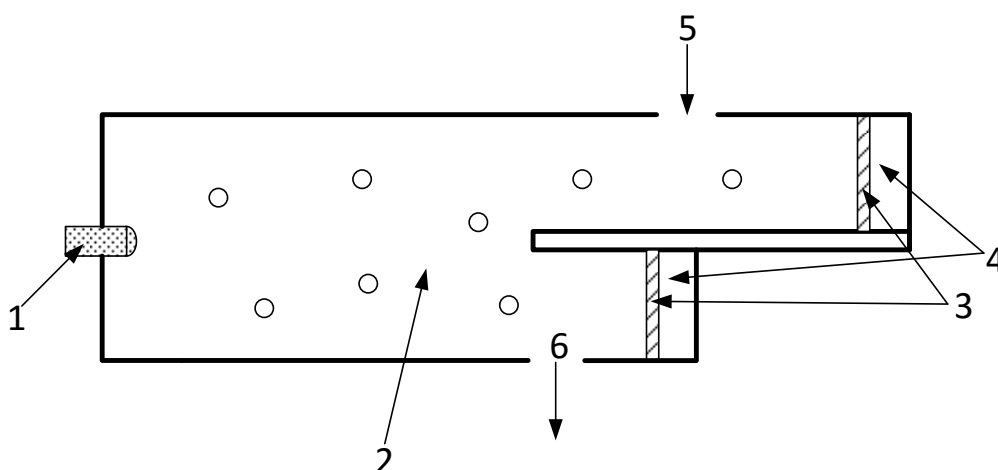
- 1- Kaitrinė lempuė;
- 2- CO₂ mėginio kamera;
- 3- Pastovios koncentracijos CO₂ kamera;
- 4- Optinis filtras;
- 5- Infraraudonųjų spindulių detektorius;
- 6- Mėginio jėjimas;
- 7- Mėginio išėjimas.

Ši konstrukcija yra netinkama nors vienas kanalas yra perslinktas koncentracijos atžvilgiu, tai neleidžia įvertinti realios koncentracijos. Tiek matavimo, tiek atramos kanalai bus vienodai paveikti pokyčių jutiklyje. Ši konstrukcija gali būti taikoma jei atraminis kanalas būtų visiškai atribotas nuo dujų patenkančių iš išorės. Tokiu atveju atraminis kanalas visada turėtų matuoti vienodą koncentraciją o bet koks poslinkis reikštų matavimo dreifą kurį būtų galima sukalibruoti. Tokio

sprendimo trūkumu būtų atraminio kanalo atskyrimas nuo išorinio užterštumo ir neįvertintume jo sudaromos matavimų paklaidos.

3.1.4. Dviejų kanalų NDIR CO₂ jutiklis su absorbcijos kanalo poslinkiu.

Šio jutiklio konstrukcija primena ankstesnius dviejų kanalų NDIR jutiklius. Jis susideda iš infraraudonųjų spindulių šaltinio kuriuo dažniausiai yra nedidelė kaitrinė lemputė. CO₂ dujos patenka į kamerą kuri yra apšvitinama infraraudonaisiais spinduliais tarp kurių yra 4,3μm bangos ilgio spinduliai kuriuos absorbuoja šios dujos. Kameroje išskiriame du kelius kuriais bangos patenka į detektorius. Vienas yra ilgesnis o kitas trumpesnis. Kelią kuriuo bangos praeina pro kamerą apibrėžiame sistemos koeficientu k . Šios konstrukcijos pagrindiniu ypatumu yra skirtingų koeficientai. Tokiame sprendime abu kanalai dirba tame pačiame bangų diapazone, turi vieną šaltinį ir jokių papildomų elementų kurie galėtų turėti įtaką matavimui.



Pav. 16 Dviejų kanalų NDIR jutiklio su absorbcijos kanalo poslinkiu principinė schema.

- 1- Kaitrinė lemputė;
- 2- CO₂ mėginio kamera;
- 3- Filtras;
- 4- Infraraudonųjų spindulių detektorius;
- 5- Mėginio įėjimas;
- 6- Mėginio išėjimas.

Šios konstrukcijos jutiklio analize pradedame nuo Beero-Lamberto dėsnio

$$I = I_0 \cdot e^{-kp};$$

Abu jutiklio kanalai turi skirtingus sistemos koeficientus k_1 ir k_2 dėl skirtingo kanalų ilgio. Priimame sistemos parametrai yra nekintantys. Abu kanalai naudoja tą patį spindulių šaltinį kurio intensyvumas CO₂ absorbuojamų bangų diapazone yra I_0 . Sistema užpildoma dujų mišiniu(oru) kuriame yra CO₂ dujų, kurių koncentracija yra p .

$$I_1 = I_0 \cdot e^{-k_1 p};$$

$$I_2 = I_0 \cdot e^{-k_2 p};$$

$$I_0 = I_1 \cdot e^{k_1 p};$$

$$I_0 = I_2 \cdot e^{k_2 p};$$

$$I_1 \cdot e^{k_1 p} = I_2 \cdot e^{k_2 p};$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{e^{k_2 p}}{e^{k_1 p}};$$

$$\ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = \ln\left(\frac{e^{k_2 p}}{e^{k_1 p}}\right);$$

$$\ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = \ln(e^{k_2 p}) - \ln(e^{k_1 p});$$

$$\ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = k_2 p - k_1 p;$$

$$\frac{\ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right)}{p} = k_2 - k_1;$$

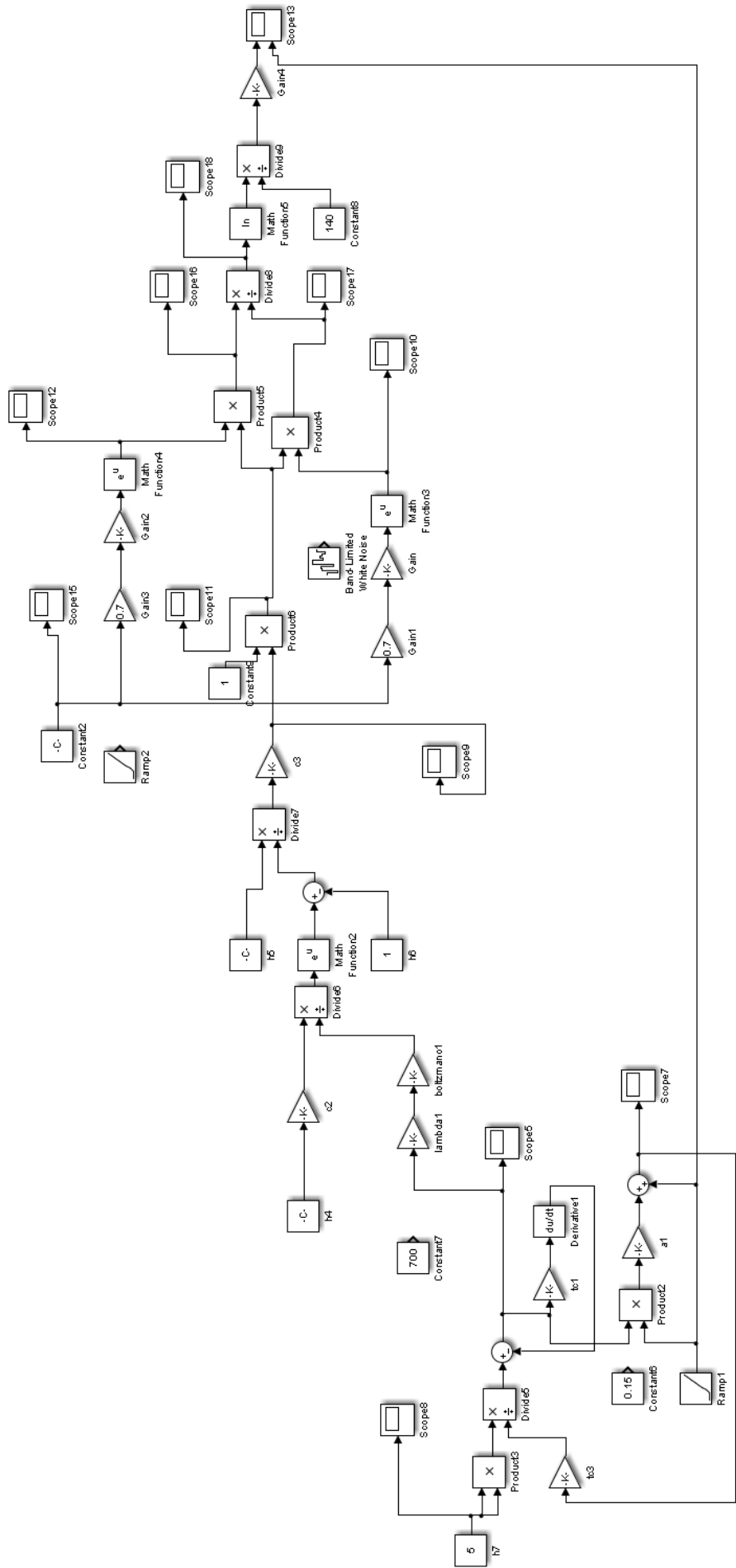
Kadangi $k_2 - k_1$ yra konstantos galime jas pakeisti bendra sistemos konstanta α (formulė nr. 30).

$$\alpha = k_2 - k_1; \quad (30)$$

$$\ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = \alpha \cdot p. \quad (31)$$

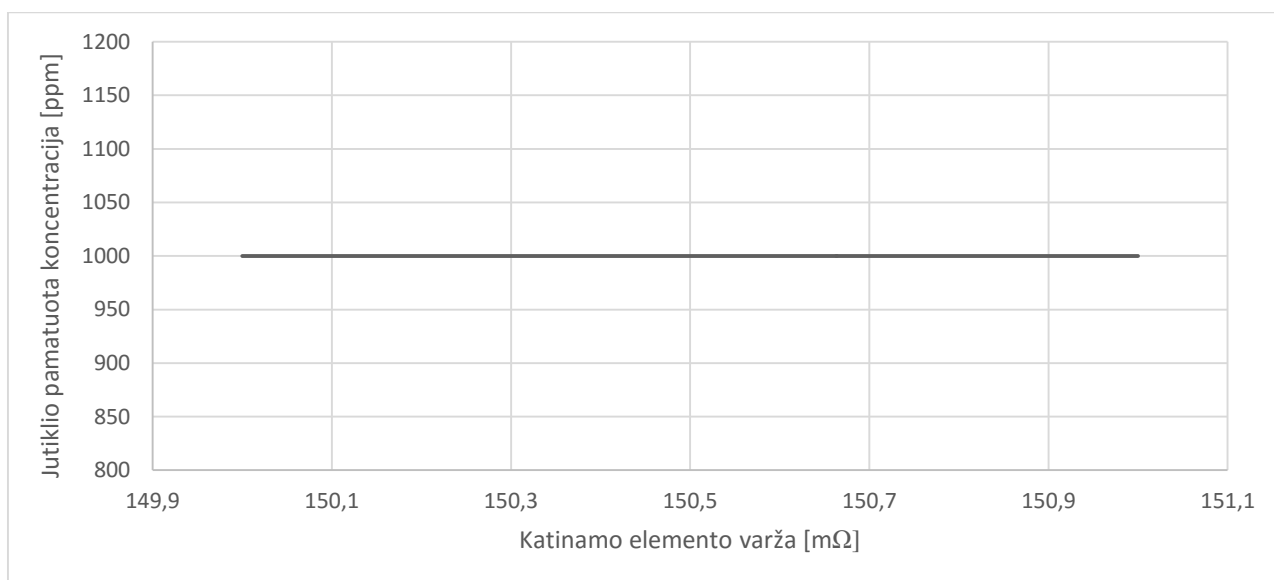
Dėka dviejų, skirtingo ilgio kanalų panaudojimo galime paskaičiuoti dujų koncentraciją nepriklausomai nuo spindulių šaltinio emisijos intensyvumo I_0 . Matuojant abiejų kanalų spindulių intensyvumo santykį $\frac{I_1}{I_2}$ galime paskaičiuoti CO₂ dujų koncentraciją. Šis santykis nepriklauso nuo šaltinio stiprumo nes abu kanalai yra paveikiami proporcingai.

Tokios konstrukcijos jutiklis neturi šaltinio senėjimo sukeliama dreifo, todėl gali veikti ilgai be papildomo prietaiso kalibravimo. Šis konstrukcinis sprendimas neturi įtakos kitiems jutiklio paklaidų šaltiniams, tokiems kaip infraraudonųjų spindulių detektoriaus paklaida.



Pav. 17 Dviejų kanalų NDIR CO2 jutiklio su absorbcijos kanalo poslinkiu modelis atliktas matlab aplinkoje

Dviejų kanalų jutikliui sumodeliuota kaitrinė lempuotė kuri aproksimuojama į absoliučiai juodą kūną. Įvykdytas dviejų kanalų kameros modelis bei signalo apdorojimo dalis. Modelyje neįvertinama fono spinduliavimas bei visų elementų spinduliuojami ir matuojami triukšmai.



Pav. 18 Sumodeliuoto dviejų kanalų NDIR CO₂ jutiklio matuojamos koncentracijos priklausomybė nuo kaitinamo elemento varžos.

Šio tipo jutiklis, naudojant atraminį kanalą, kompensuoja šaltinio emituojamų spindulių intensyvumo pokyčius. Matuojama koncentracija nepriklauso nuo absoliutaus šaltinio intensyvumo o tik nuo abiejuose kanaluose detektuojamų spindulių intensyvumų santykio. Teisingai sukonstruotas tokio tipo jutiklis gali dirbti ilgą laiką be kalibravimo.

Šio tipo jutiklis turi dar vieną privalumą. Dėka skirtingų sistemos koeficientų jis gali būti naudojamas kaip dviejų diapazonų jutiklis. Kartu abu kanalai leidžia matuoti aukštas koncentracijas, kartu neprarandant tikslumo atliekant mažų dujų koncentracijų matavimą.

Šios konstrukcijos jutiklis turi aiškių pranašumą prieš visus kito tipo jutiklius. Vieninteliu jo trūkumu yra didesnė nei vieno kanalo jutiklio kaina.

4. Eksperimentinė dalis

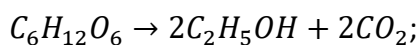
CO₂ jutiklių derinimui reikalinga turėti žinomos koncentracijos kamerą kurioje galima palyginti jutiklių CO₂ koncentracijos matavimų rezultatus visame diapazone. Tokioje kameroje jutikliai yra derinami pagal atraminį jutiklį.

Šioje dalyje pristatomi du i pastovios CO₂ koncentracijos palaikymo šaltiniai. Abu šaltiniai gali palaikyti pastovią ilgalaikę koncentraciją. Pirmas iš jų reguliuoja anglies dioksido kiekį variuojant cheminį procesą, antras, atitinkamai paduodant CO₂ iš dujų baliono.

4.1. Cheminio proceso valdymas palaikant pastovią CO₂ koncentraciją.

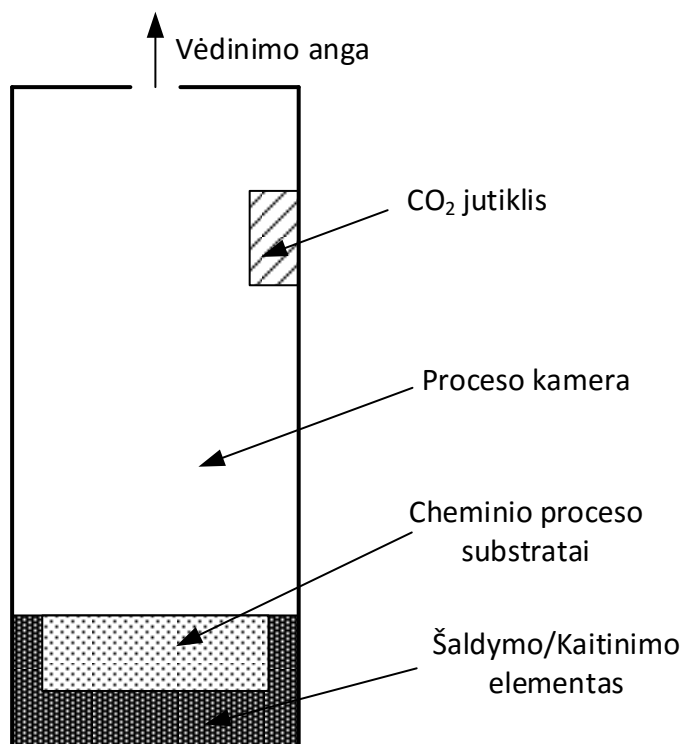
Cheminiai procesai kuriuose išsiskiria anglies dioksidas gali būti valdomi panaudojant NDIR CO₂ jutiklius. Pats valdymas gali priimti įvairias formas, tokias kaip proceso temperatūros keitimas, proceso medžiagų padavimo keitimas (pvz.: deguonies).

Tokio cheminio proceso pavyzdžiu gali būti fermentacija:



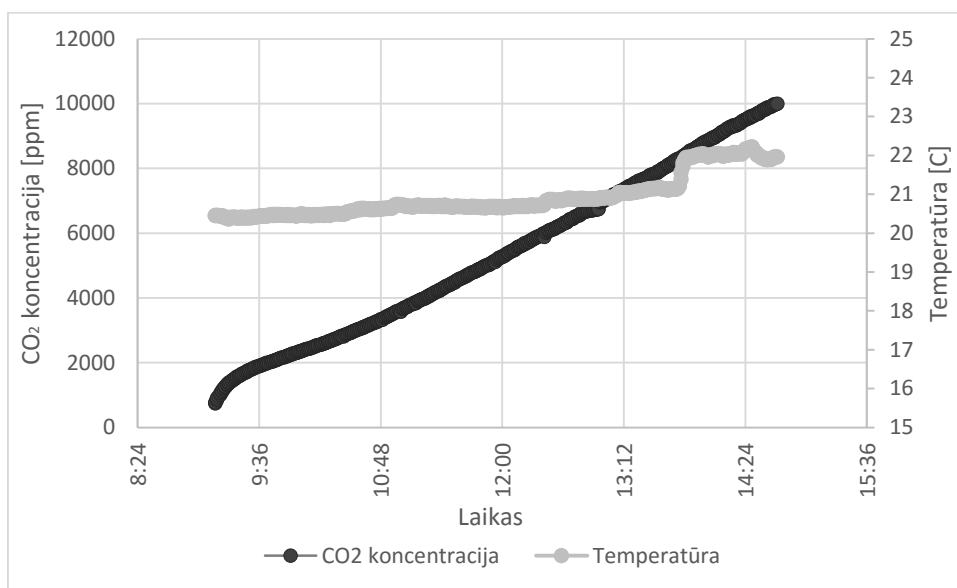
Tokio proceso greitis gali būti reguliuojamas temperatūra. Kaitinant procesas pradeda vykti greičiau, šaldant sulėtėja.

Buvo atliktas fermentacijos proceso bandymas. Procesas buvo valdomas naudojant Fluke 7102 termostatą kuris sugeba palaikyti temperatūra nuo -5°C iki 125°C.



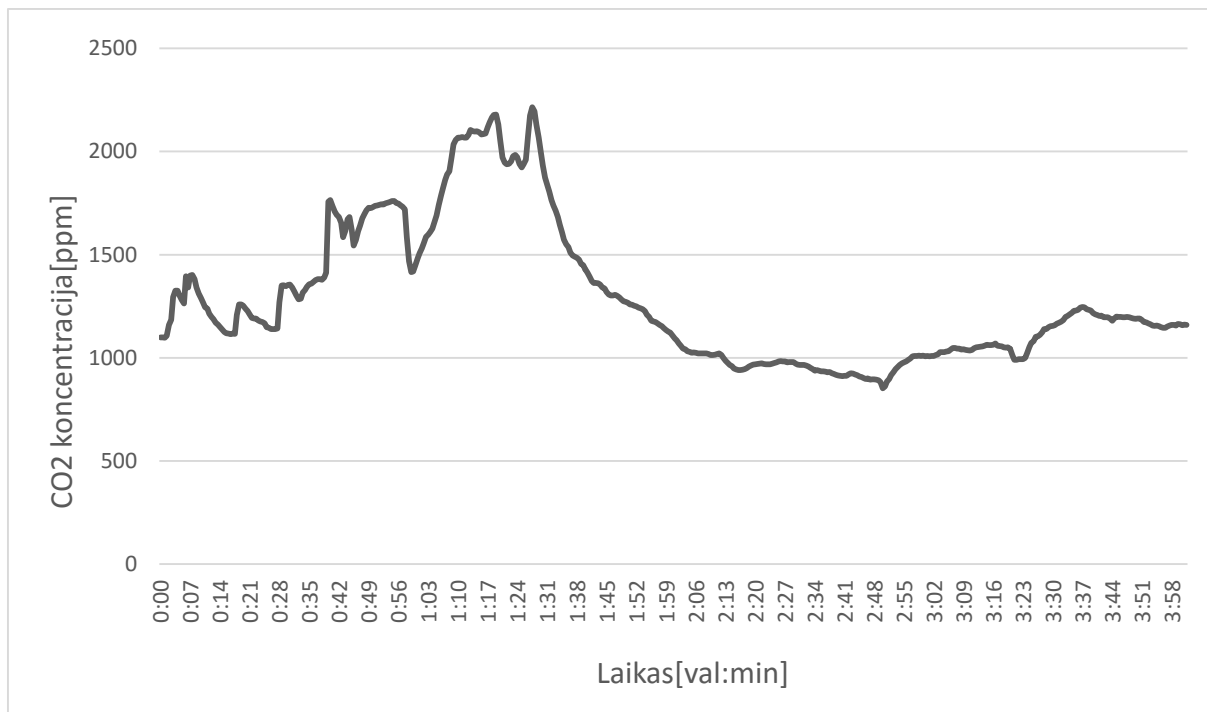
Cheminio proceso substratai buvo patalpinti metalinėje dėžutėje kuri buvo įdėta į termostatą. Dėžutėje buvo patalpintas NDIR CO₂ jutiklis K-30 ir palikta nedidelė anga pro kuria oras vėdinasi. Bandymo tikslas buvo palaikyti pastovią CO₂ dujų koncentraciją kuri reikštų pastovaus greičio procesą kuriame susikuria tiek pat anglies dioksido kiek išsivėdina pro angą. Procesas valdomas panaudojant kompiuterį ir MATLAB programinį paketą.

Prieš bandymą buvo atliktas proceso matavimas kuriame sudrėkinti grūdai buvo uždaryti sandarioje dėžutėje ir buvo pamatuotas natūralus CO₂ susidarymo procesas.



Pav. 20 CO₂ koncentracijos didėjimas vykstant grūdų rauginimui.

Kaip matome paveikslėlyje Nr. 20, raugimo procesas vyksta lėtai, yra tiesinis. Iš paveikslėlio galime nuspėti kad valdymas turės ilgą laiką pastovias.



Pav. 21 Cheminio proceso reguliavimas palaikant pastovią sistemos CO₂ koncentraciją

Paveiksle 21 matome bandymą reguliuoti cheminį procesą palaikant pastovią anglies dioksido koncentraciją. Bandymo metu, naudojant PID reguliatorių buvo bandoma išlaikyti 1000 ppm CO₂

koncentraciją. Proceso greitis buvo reguliuojamas keičiant aplinkos, kurioje vyksta cheminis procesas, temperatūrą. Bandymo rezultatai nėra visiškai patenkinantys, procesas yra labai jautrus, turi didelę vėlinimo pastoviąją. Anglies dioksidas susikaupęs gilesnėse grūdų vietose pūpsniais patekdavo į jutiklį ir išreguliuodavo procesą.

Cheminio proceso reguliavimas naudojant CO₂ grįžtamą ryšį yra įvykdomas tačiau sunku pasiekti atitinkamą tikslumą ir sistemos stabilumą.

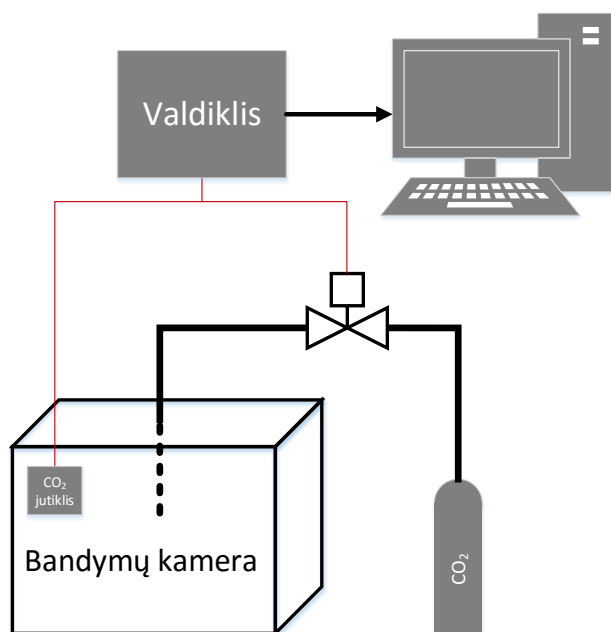
Bandymo metu pastebėta NDIR jutiklio klaidingi matavimai jei aplinkos temperatūra pasikeičia staigiai.

4.2. Pastovios koncentracijos CO₂ šaltinis

CO₂ jutiklių metrologinių charakteristikų tyrimui bei procesų, kuriuose išsiskiria anglies dioksidas, simuliacijai, bei jutiklių derinimui konstruojamas CO₂ šaltinis kuris, naudojant balioną su anglies dioksidu, palaikis pastovią koncentraciją jutiklių matavimų diapazone.

Siekiami šaltinio parametrai:

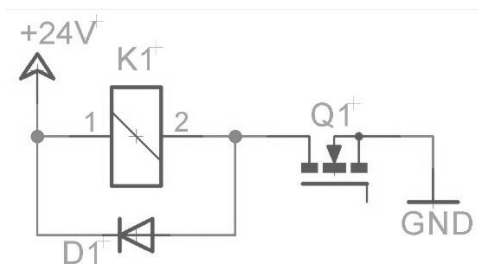
- darbo ribos 1000-9000ppm
- paklaida 1000-9000ppm : ±10%



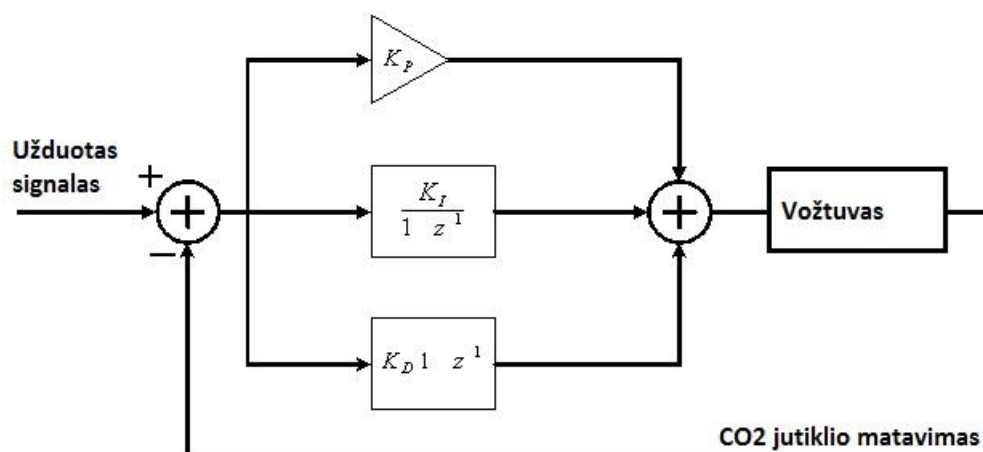
Pav. 22 CO₂ šaltinio sistemos principinė schema

Iš dujų baliono tekančio CO₂ slėgis yra sumažinamas per slėgio reduktorių. Anglies dioksidas porcijomis paduodamas į šaltinio kamerą. Paduodamo CO₂ kiekis yra reguliuojamas vožtuvu.

Anglies dioksido jutiklis esantis kameroje registruoja CO₂ koncentraciją ir perteikia duomenis į valdiklį. Valdiklyje yra užprogramuotas PID reguliatorius kuris pagal užduotą reikšmę ir grįžtamą ryšį skaičiuoja kiek CO₂ reikia įleisti į kamerą. Valdiklis valdo vožtuvą naudojant mosfet tranzistorių. Jutiklio matavimo rezultatai naudojami kaip grįžtamasis ryšys PID reguliatoriui bei iššviečiami kompiuteryje per valdiklio komunikacijos sąsają kartu su reguliatoriaus išėjimo signalu.



Pav. 23 Šaltinio galios grandinė



Pav. 24 Principinė valdymo grandinės schema

PID reguliatorius susideda iš trijų komponentų: proporcinės, integracinės ir diferencinės. Proporcinė grandis skaičiuoja skirtumą tarp užduotos vertės ir grįžtamo ryšio pamatuotos vertės. Integracinė grandis sumuoja visas ankstesnes paklaidas nuo užduotos vertės. Diferencinė grandis skaičiuoja paklaidos pokyčio greitį. Visos grandys yra padauginamos iš atitinkamų koeficientų ir sumuojamos. Gaunamas rezultatas kuris yra proporcingas reikiamam proceso poveikiui.

PID reguliatorius veikia efektyviai tik kai visų grandžių koeficientai yra gerai nustatyti.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau + K_d \cdot \frac{d}{dt} \cdot e(t) \quad (32)$$

K_p – Proporcingos grandies koeficientas;

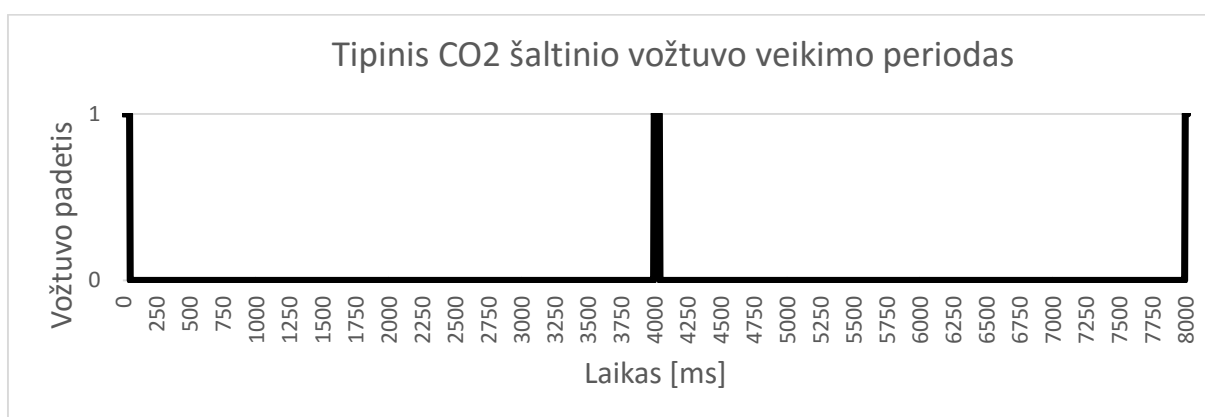
$e(t)$ – Nuokrypis nuo užduotos vertės;

K_i – Integracinės grandies koeficientas;

K_d – Diferencinės grandies koeficientas;

$u(t)$ – PID regulatoriaus išėjimo vertė.

PID regulatoriaus išėjimo signalas valdo impulso pločio moduliacijos grandį kuri valdo vožtuvą. Kameroje naudojamas dviejų padėčių vožtuvas. Jis valdomas PIM signalu kurio periodas 4s. Vožtuvas atidaromas trumpiems laiko tarpams kurie paprastai yra tarp 10ms ir 1000ms. Vožtuvo atidarymo laikas yra proporcingas PID regulatoriaus išėjimui.



Pav. 25 Vožtuvo atidarymo periodas.

Pastovios anglies dioksido koncentracijos palaikymo šaltinis grįžtamam ryšiui naudoja K-30 10,000ppm CO₂ jutiklį kuris naudoja NDIR matavimo metodą.

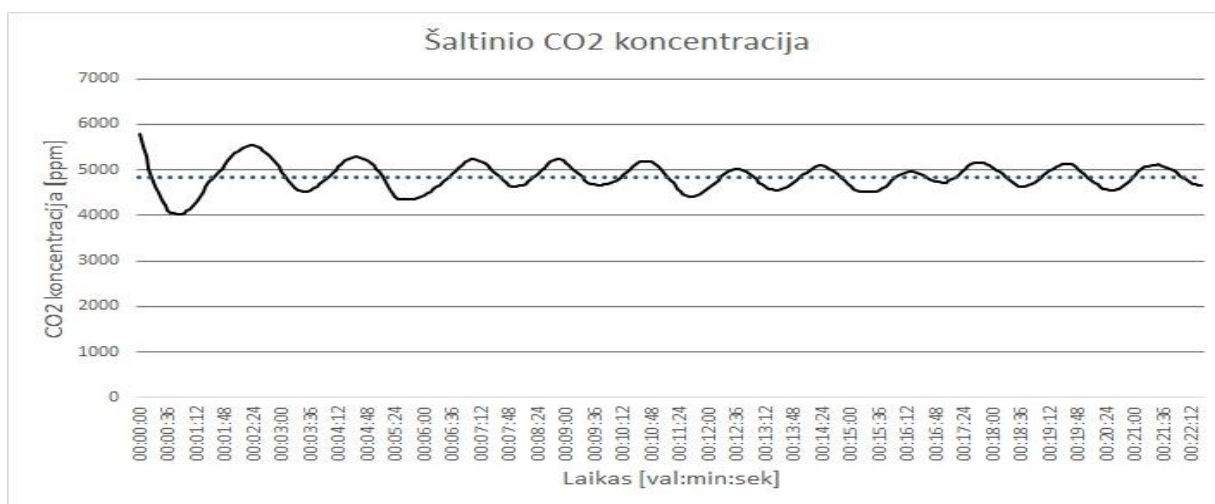
Lent. 2 K-30 jutiklio specifikacija:

Matavimo ribos	0-10000ppm
Atkartojamumas	±20ppm±1% pamatuotos vertės
Tikslumas	±30ppm±3% pamatuotos vertės
Vidutinė veikimo trukmė	>15 metų
Jutiklio apšilimo laikas	<1 minutė
Vidutinis srovės sunaudojimas	40 mA
Įtampa	4,5-14V
Greitaveika	0,5 matavimo/ sekundę

Sukonstruotas šaltinis palaiko užduotą anglies dioksido koncentraciją. CO₂ procesas yra lėtas, jutiklis rezultatus registruoja su 40s užvėlavimu. Vožtuvas yra inertiškas, įsijungia su nedideliu užvėlavimu ir reaguoja tik į signalus ilgesnius nei 10ms. Vožtuvo netikslumai įveda valdymo netikslumų. Slėgio ribotuvai prie mažų slėgių kurie naudojami šaltinyje yra netiesiškas. Diafragma netiksliai palaiko slėgį. Pučiamų dujų kiekis vožtuvo atidarymo pradžioje yra didesnis ir silpnėja su vožtuvo atidarymo laiku.

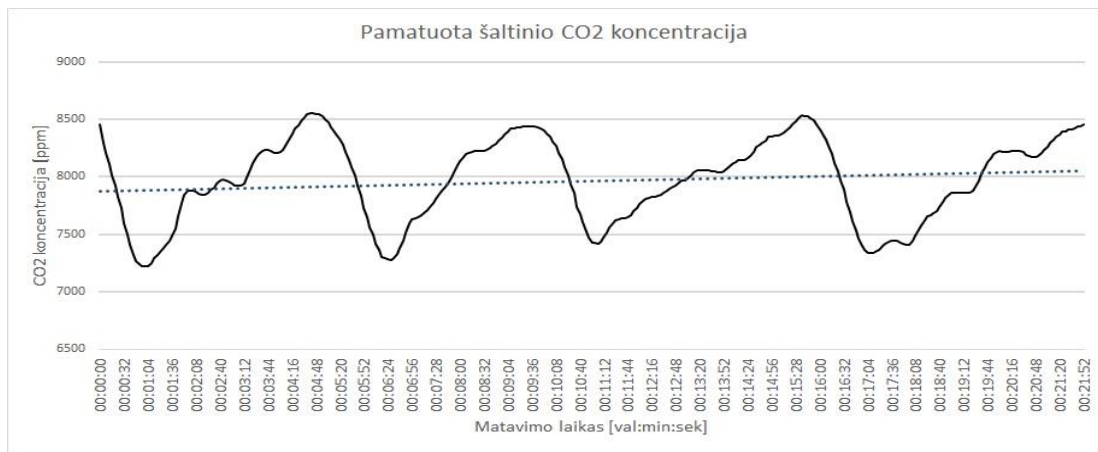
Pats procesas yra pusiau valdomas. Galima užkelti CO₂ koncentracijos lygį, tačiau koncentracijos mažėjimas yra natūralus, priklauso nuo šaltinio kameros konstrukcijos, vėdinimo angų ir oro apykaitos.

Didelę įtaką proceso stabilumui turi panaudoto vožtuvo praleidžiamų dujų netiesiškumas. Kai vožtuvo atsidarymo laikas trumpas praleidžiamų dujų kiekis yra netolygus. Dėl šių priežasčių tiriamas procesas periodiškai svyruoja.



Pav. 26 CO₂ jutiklio matavimo rezultatai, kai užduota 5000ppm.

Šaltiniui uždavus 5000ppm per 20 minučių buvo surenkama matavimo rezultatai. Matavimas atliekamas kas 4 sekundes. Matuojamo signalo vidurkis 4839ppm, o standartinis nuokrypis 294ppm.



Pav. 27 CO₂ jutiklio matavimo rezultatai, kai užduota 8000ppm.

Šaltiniui uždavus 8000ppm matuojamo signalo vidurkis 7967ppm, o standartinis nuokrypis 364ppm.

5. Išvados

- Šiuo metu NDIR jutikliai yra vieninteliai plačiai taikomi CO₂ dujų jutikliai kurių veikimo principu nėra cheminė reakcija. Toks matavimo būdas leidžia pagaminti ilgaamžį jutiklį kurio resursus nesureaguoja;
- NDIR jutikliai matuoja dujų kiekį, todėl siekiant užtikrinti tikslų matavimą plačiuose temperatūros, slėgio ir drėgmės diapazonuose, šie faktoriai turi būti kompensuojami;
- NDIR jutiklių didžiausias trūkumas yra matavimų dreifas;
- NDIR jutiklio matavimo tikslumas priklauso nuo jutiklio matavimo diapazono;
- Situacijose kada į jutiklį reguliariai paduodamas šviežias oras, o jutiklio kainą svarbesnė už matavimo tikslumą, galima naudoti vieno kanalo CO₂ jutiklius;
- Norint ilgą laiką tiksliai matuoti anglies dioksido koncentraciją reikia naudoti dviejų kanalų jutiklį su absorbcijos kanalo poslinkiu;
- CO₂ jutiklis gali būti naudojamas efektyvaus patalpų ventiliacijos uždaviniuose. Patalpose, jutiklio matavimai koreliuoja su žmonių buvimu ir fiziniu aktyvumu;
- NDIR CO₂ jutiklis gali būti naudojamas cheminių procesų, kuriuose išsiskiria anglies dioksidas, reguliavimui. Toks procesas gali būti suvaldomas tačiau grįžtamasis ryšys yra nestabilus. CO₂ dujos išsiskirsto kameroje nevienodai.

6. Literatūros sąrašas

1. Wong, J. *Non-Dispersive Infrared Gas Measurement*. Barcelona, 2012, ISBN 978-84-615-9732-1
2. Rogalski, A. *Infrared detectors*, 2011, ISBN 978-1-4200-7671-4
3. Siegel, R. *Thermal radiation heat transfer*. New York, 2001, ISBN 978-1-56032-839-1.
4. Banwell, C. *Fundamentals of Molecular Spectroscopy*. 1994, ISBN 978-0077079765.
5. Stuart, B. *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications*, 2004, 244p., ISBN 978-0-470-85428-0
6. *Infrared Spectroscopy: Theory*, Boulder: Dept of Chem and Biochem, 2002, Prieiga per internetą: <http://orgchem.colorado.edu/Spectroscopy/irtutor/IRtheory.pdf>
7. Lienhard, J. *A heat transfer textbook*, 2008, ISBN 978-0486479316
8. *The Rotronic Humidity Handbook*, 2005 Prieiga per internetą: http://www.southeastern-automation.com/PDF/Rotronic/Humidity_Handbook.pdf
9. *How to Measure Carbon Dioxide*, Prieiga per internetą: <http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents / Application%20notes /CEN-TIA-Parameter-How-to-measure-CO2-Application-note-B211228EN-A.pdf>
10. Jason Seitz, Chenan Tong, *LMP91051 NDIR CO2 Gas Detection System*, 2013, Prieiga per internetą: <http://www.ti.com/lit/an/snaa207/snaa207.pdf>
11. Ryadh Abdullah Zakaria, *NDIR instrumentation design for CO₂ gas sensing*, 2009
12. Desmond Gibson ir Calum MacGregor, *A Novel Solid State Non-Dispersive Infrared CO₂ Gas Sensor Compatible with Wireless and Portable Deployment*, 2013
13. Frodl, R. *A high precision NDIR CO₂ gas sensor for automotive applications.*, 2006
14. Kyuseok Song, *Recent Developments in Modulation Spectroscopy for Trace Gas Detection Using Tunable Diode Lasers.*, 2003
15. Jinhong LI, Kun LIU, WeiJun Zhang, Weidong Chen and Xiaoming Gao L, *Carbon dioxide detection using NIR diode laser based wavelength modulation photoacoustic spectroscopy.*, 2008.

16. Edwards, H. *Gas sensors using correlation spectroscopy compatible with fibre-optic operation*, 1993, prieiga per internetą <http://www.orc.org.uk/publications/06xx/628.pdf>
17. M. Noro, K. Suzuki, N. Kishi, H. Hara, T. Watanabe and H. Iwaoka, "CO₂/H₂O gas sensor with a fabry-perot filter," , 2002
18. Wong, J. *Non-Dispersive Infrared (NDIR) Gas Measurement: Past, Present & Future.*, 2013
19. Ehleringer, J. *A History of Atmospheric CO₂ and Its Effects on Plants, Animals, and Ecosystems*, 2005, ISBN 978-0387220697.
20. Worthington, J. *60 years of continuous improvement in NDIR gas analyzers*, 2005, Prieiga per internetą
<http://files.abstractsonline.com/ctrl/4b/b/120/3a0/56e/41d/88a/a53/984/413/023/41/a433>
21. Chen, S. *A simple, low-cost non-dispersive infrared CO₂ monitor*. 2002, ISBN 1-55617-834-4
22. Smith, R. *Detection and Measurement of Infrared Radiation*, 1968, ISBN 978-0198513247
23. Nelson, T.J. *Cold Facts on Global Warming*, 2003, prieiga per internetą:
<http://www.randombio.com/co2.html>