

Miten hiilidioksidia mitataan



Hiilidioksidia mitataan monissa sovelluksissa rakennusautomaatiosta ja kasvihuoneista biotieteisiin ja työntekijöiden turvallisuuteen.

Tässä julkaisussa käsitellään seuraavia aiheita:

- *infrapuna-hiilidioksidianturien toimintaperiaate*
- *yleinen kaasulaki ja sen soveltaminen ympäristötekijöiden kompensoimiseksi hiilidioksidimittauksessa*
- *hiilidioksidilähettimien optimaalinen sijoittelu*
- *hiilidioksidi ja turvallisuus.*

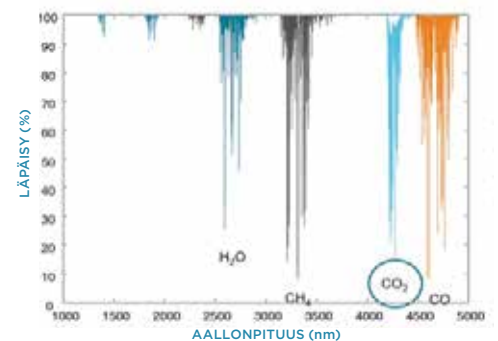
Infrapuna-anturin toimintaperiaate

Hiilidioksidi ja muut vähintään kahdesta erilaisesta atomista koostuvat kaasut absorboivat infrapunasäteilyä niille ominaisella tavalla. Tällaiset kaasut voidaan havaita käyttämällä infrapunatekniikoita. Vesihöyry, metaani, hiilidioksidi ja hiilimonoksidi eli häkä ovat esimerkkejä kaasuista, joita voidaan mitata infrapuna-anturin avulla. Niille ominaiset absorptiojuovat esitetään [kuvassa 1](#).

Infrapunateknologia on yleisimmin käytetty hiilidioksidin mittaamenetelmä. Infrapuna-antureissa on useita etuja kemiallisiin antureihin verrattuna. Ne ovat stabiileja ja hyvin selektiivisiä mitattavalle kaasulle. Niillä on pitkä käyttöikä, ja

koska mitattava kaasu ei ole suoraan vuorovaikutuksessa anturin kanssa, infrapuna-anturit kestävät hyvin korkeita kosteuspitoisuuksia, pölyä, likaa ja muita vaativia olosuhteita.

Infrapuna-hiilidioksidianturin tärkeimmät osat ovat valonlähde, mittauskammio, interferenssisuodatin ja infrapunadetektori. Valonlähde tuottaa infrapunasäteilyä, joka ohjataan mitattavan kaasun läpi detektoriin. Detektorin edessä sijaitseva suodatin estää muiden kuin mitattavalle kaasulle ominaisten aallonpituuksien pääsyn detektoriin. Detektori havaitsee sille saapuvan säteilyn voimakkuuden, joka muunnetaan kaasun pitoisuudeksi.



Kuva 1. Hiilidioksidin (CO₂) ja joidenkin muiden kaasujen infrapuna-absorptio

Vaisala CARBOCAP®-hiilidioksidianturi käyttää infrapuna-anturitekniikkaa hiilidioksidipitoisuuden mittaamiseen. Anturi sisältää ainutlaatuisen, sähköisesti säädettävän Fabry-Perot-interferometrisuodattimen, joka mahdollistaa mittauksen kahdella eri aallonpituudella. Tämä tarkoittaa, että CARBOCAP®-anturi tekee hiilidioksidin absorptiomittauksen lisäksi myös referenssimittauksen, jolla kompensoidaan mahdollisia valonvoimakkuuden muutoksia sekä lian ja muiden epäpuhtauksien aiheuttamia mittausvirheitä. Referenssimittaus varmistaa anturin pitkäaikaisen vakauden. Voit tutustua Vaisalan hiilidioksidin mittaamiseen soveltuviin tuotteisiin osoitteessa www.vaisala.fi/CO2.

Ideaalikaasulaki

Ideaalikaasulaista on hyötyä arvioitaessa lämpötila- ja painemuutosten vaikutuksia hiilidioksidimittaukseen. Sitä voidaan käyttää hiilidioksidilukemien kompensointiin.

Ideaalikaasu on teoreettinen kaasu, joka koostuu satunnaisesti liikkuvista identtisistä pistehiukkasista. Hiukkaset ovat mitättömän pieniä, joten molekyylien väliset voimat ovat merkityksettömiä. Ideaalikaasumolekyylien oletetaan törmäävän kimmoisasti sekä toistensa että säiliön seinämien kanssa.

Todellisuudessa kaasut eivät käyttäydy täsmälleen ideaalikaasun tavoin, mutta mallia käytetään usein myös todellisten kaasujen käyttäytymisen kuvaamiseen. Ideaalikaasulaki määrittää tietyn kaasumäärän paineen, tilavuuden ja lämpötilan välisen suhteen seuraavan kaavan mukaisesti:

$$pV = nRT$$

missä

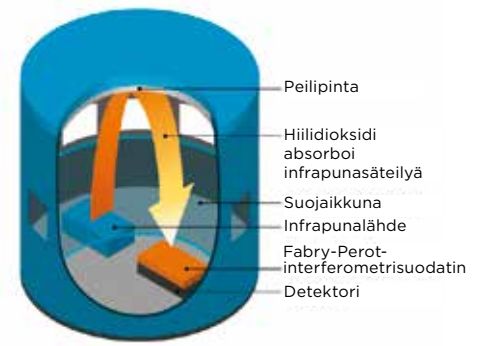
$$p = \text{paine [Pa]}$$

$$V = \text{kaasun tilavuus [m}^3\text{]}$$

$$n = \text{kaasun ainemäärä [mol]}$$

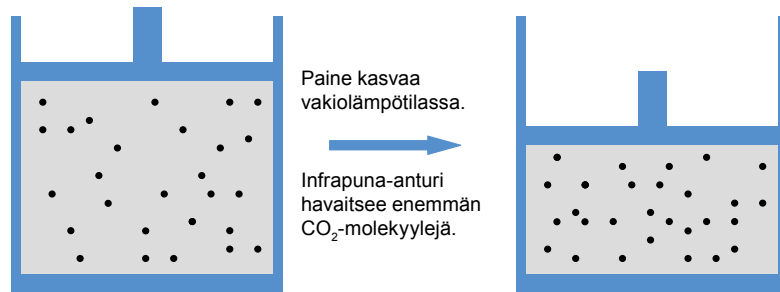
$$R = \text{yleinen kaasuvakio (= 8,3145 J/mol K)}$$

$$T = \text{lämpötila [K]}$$

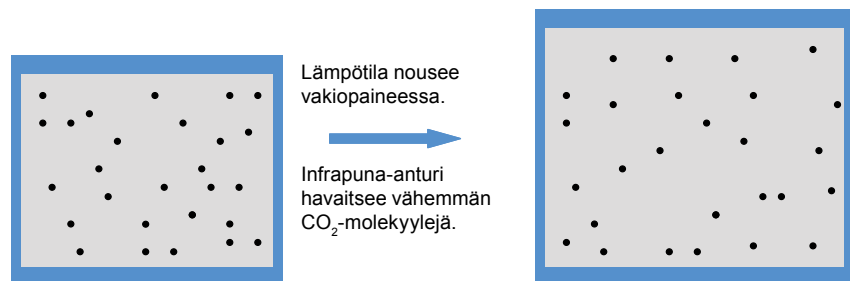


Kuva 2. Vaisala CARBOCAP®-hiilidioksidianturin rakenne

Paine kasvaa lämpötilan pysyessä vakiona



Lämpötila nousee paineen pysyessä vakiona



Hiilidioksidilähettimeiden optimaalinen sijoittelu

- Vältä paikkoja, joissa ihmiset saattavat hengittää suoraan anturiin. Vältä myös asettamasta antureita ilmanotto- ja ilmanpoistokanavien, ikkunoiden ja ovien läheisyyteen.
- Tarpeenmukaisessa ilmanvaihdossa seinään asennettavat anturit antavat tarkempaa tietoa ilmanvaihdon tehokkuudesta kuin kanavaan asennettavat anturit. Kanavaan asennettavat anturit sopivat parhaiten järjestelmiin, joissa kokonaista aluetta ohjataan samalla säädöllä. Anturit tulee asentaa mahdollisimman lähelle käytössä olevaa aluetta, jotta ne on helppo huoltaa.
- Kun hiilidioksidia mitataan turvallisuusriskien minimoimiseksi, lähettimeet tulee asentaa lähelle mahdollisia vuotokohtia, jotta vuodot voidaan havaita mahdollisimman varhain. Valvottavan alueen geometria, ilmanvaihto ja ilmavirtaus täytyy ottaa huomioon. Hiilidioksidilähettimeiden määrän ja sijainnin tulee perustua riskiarviointiin.

Lämpötilan ja paineen vaikutus hiilidioksidimittaukseen

Useimpien kaasuanturien lähtösignaali on verrannollinen mitattavan kaasun molekyyliitiheyteen (molekyylejä/kaasun tilavuus), vaikkakin laitteen lukema ilmaistaan miljoonasosina (tilavuus/tilavuus, ppm). Paineen tai lämpötilan muuttuessa kaasun molekyyliitiheys muuttuu ideaalikaasulain mukaisesti. Muutos näkyy anturin ppm-lukemassa.

Seuraavat kuvat havainnollistavat sitä, miten paineen tai lämpötilan muutos vaikuttaa kaasun tilaan ja hiilidioksidin mittaukseen.

Ideaalikaasulakia voidaan käyttää kaasun molekyyliitiheyden laskemiseen tietyssä lämpötilassa ja paineessa, kun kaasun tiheys ympäristön vakio-olosuhteissa (Standard Ambient Temperature and Pressure, SATP) tunnetaan. Kun kaasun ainemäärä (n) korvataan arvolla pV/M ja kaasun moolimassan (M) oletetaan olevan vakio eri olosuhteissa, laskutoimitus voidaan kirjoittaa yhtälön 1 avulla.

Tiheyskaavan avulla voidaan arvioida, miten kaasuanturin lukema muuttuu lämpötilan tai paineen muuttuessa.

Kaavaa voidaan käyttää myös lämpötilan ja paineen muutosten kompensointiin

		Lämpötila (°C)									
		-20	-10	0	10	20	25	30	40	50	60
Paine (hPa)	700	814	783	754	728	703	691	680	658	638	618
	800	930	895	862	832	803	790	777	752	729	707
	900	1046	1007	970	936	904	888	874	846	820	795
	1000	1163	1119	1078	1039	1004	987	971	940	911	883
	1013	1178	1133	1092	1053	1017	1000	983	952	923	895
	1100	1279	1230	1185	1143	1104	1086	1068	1034	1002	972
	1200	1395	1342	1293	1247	1205	1185	1165	1128	1093	1060
	1300	1512	1454	1401	1351	1305	1283	1262	1222	1184	1148

Taulukko 1. Hiilidioksidianturin ppm-lukema, kun kaasua, jonka pitoisuus on 1 000 ppm, mitataan eri lämpötila- ja paineolosuhteissa

$$\rho(t, p) = \rho(25^{\circ}\text{C}, 1013\text{hPa}) \times \frac{p}{1013} \times \frac{298}{(273+t)}$$

missä

- ρ = kaasun (tilavuus)pitoisuus [ppm tai %]
- p = paine [hPa]
- t = ympäristön lämpötila [°C]

Yhtälö 1. Kaasupitoisuuden laskeminen tietyssä lämpötilassa ja paineessa

hiilidioksidimittauksissa. Tyypillisesti hiilidioksidimittalaitteet eivät mittaa painetta, eivätkä ne siksi kykene automaattisesti kompensoimaan paineen vaihteluita. Kun mittalaitteet kalibroidaan tehtaalla, olosuhteet asetetaan tavallisesti vastaamaan merenpinnan paineolosuhteita (1 013 hPa). Muulla kuin merenpinnan tasolla mitattaessa on hyvä kompensoida paineen vaikutus mittaukseen. Tämä voidaan tehdä joko syöttämällä oikeat paineasetukset sisäistä kompensointia varten (vakioaine) tai ohjelmoimalla kompensointi automaatiojärjestelmään tai tietokoneelle (vaihtuvat paineolosuhteet).

Samoja sääntöjä voidaan soveltaa lämpötilan vaikutusta kompensoitaessa. Nykyään on kuitenkin saatavilla yhä enemmän hiilidioksidimittalaitteita, jotka sekä mittaavat että kompensoivat lämpötilan muutoksia, eivätkä ne siksi tarvitse ulkoista kompensointia.

Taulukossa 1 on esimerkki ideaalikaasun mukaisista hiilidioksidianturin lukeman muutoksista (kaasu sisältää 1 000 ppm hiilidioksidia SATP-olosuhteissa) lämpötilan ja paineen muuttuessa.

Kostean kaasunäytteen kuivaaminen

Ideaalikaasulain avulla voidaan ymmärtää, mitä tapahtuu, kun kaasuseoksen koostumus muuttuu vakioaineessa, -lämpötilassa ja -tilavuudessa. Tästä on hyötyä esimerkiksi arvioitaessa kosteuden muutoksen vaikutusta hiilidioksidilukemaan.

Kaasuseoksen molekyylit ovat samassa tilavuudessa (V on sama kaikille kaasuille) ja samassa lämpötilassa. Ideaalikaasulakia voidaan muokata seuraavaan muotoon:

$$p = (n_{\text{kaasu1}} + n_{\text{kaasu2}} + n_{\text{kaasu3}} + \dots + n_{\text{kaasu},n}) \times \frac{RT}{V}$$

missä

- n_{kaasu1} = kaasun 1 ainemäärä [mol]
- n_{kaasu2} = kaasun 2 ainemäärä [mol]
- jne.

ja

$$p = p_{\text{kaasu1}} + p_{\text{kaasu2}} + p_{\text{kaasu3}} + \dots + p_{\text{kaasu},n}$$

missä

- p = kaasuseoksen kokonaispaine
- p_{kaasu1} = kaasun 1 osapaine
- p_{kaasu2} = kaasun 2 osapaine jne.

Toista kaavaa kutsutaan Daltonin osapainelaiksi. Sen mukaan kaasuseoksen kokonaispaine on seoksen kaikkien kaasujen osapaineiden summa.

Tätä tietoa voidaan hyödyntää arvioitaessa vesihöyryn vaikutusta hiilidioksidianturin lukemaan. Kun vesihöyryä lisätään kuivaan kaasuun vakiopaineessa, -lämpötilassa ja -tilavuudessa, vesimolekyylit syrjäyttävät osan kaasuseoksen muista molekyyleistä. Samalla tavalla, kun erittäin kosteasta ympäristöstä otetaan kaasunäyte ja annetaan sen kuivua ennen vientiä hiilidioksidimittalaitteen mittauskammioon, vesimolekyyliden väheneminen kaasunäytteen kuivuessa muuttaa kaasun koostumusta, mikä vaikuttaa hiilidioksidimittaukseen.

Tätä niin sanottua laimennusvaikutusta voidaan arvioida taulukon 2 avulla. Erittäin kostean ympäristön

T_d (°C)	T_d (°C)	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60
	ppm H ₂ O	127	377	1 020	2 580	6 060	12 200	23 200	42 000	73 000	122 000	197 000
-60	11	0.9999	0.9996	0.999	0.997	0.994	0.988	0.977	0.958	0.927	0.878	0.803
-50	39	0.9999	0.9997	0.999	0.997	0.994	0.988	0.977	0.958	0.927	0.878	0.803
-40	127	1.0000	0.9997	0.999	0.998	0.994	0.988	0.977	0.958	0.927	0.878	0.803
-30	377		1.0000	0.999	0.998	0.994	0.988	0.977	0.958	0.927	0.878	0.803
-20	1 020			1.000	0.998	0.995	0.989	0.978	0.959	0.928	0.879	0.804
-10	2 580				1.000	0.997	0.990	0.979	0.961	0.930	0.880	0.805
0	6 060					1.000	0.994	0.983	0.964	0.933	0.884	0.809
10	12 200						1.000	0.989	0.970	0.939	0.890	0.815
20	23 200							1.000	0.981	0.950	0.901	0.826
30	42 000								1.000	0.969	0.920	0.845
40	73 000									1.000	0.951	0.876
50	122 000										1.000	0.925
60	197 000											1.000

Taulukko 2. Laimentumiskertoimet kaasunäytettä kuivattaessa

hiilidioksidipitoisuus voidaan laskea, kun kuivatun kaasun hiilidioksidipitoisuus tunnetaan. Sekä märkä- että kuivaolosuhteiden kastepisteen (T_d 1 013 hPa:n paineessa) tai vesipitoisuuden (ppm) täytyy olla tiedossa. Erittäin kostean ympäristön kosteusolosuhteet valitaan vaakariviltä ja kuivatun kaasun olosuhteet pystyriviltä.

Esimerkki: Kaasunäyte otetaan ympäristöstä, jonka kastepiste on 40 °C (73 000 ppm vettä),

ja tuodaan ympäristöön, jonka kastepiste on 20 °C T_d (23 200 ppm vettä). Mitattu 5,263 prosentin hiilidioksidipitoisuus kastepistelämpötilassa 20 °C T_d tarkoittaa 5,000 prosentin hiilidioksidipitoisuutta ympäristössä, jossa kastepiste on 40 °C T_d (5,263 % × 0,950 = 5,000 %). Matalampi lukema johtuu suuremman vesihöyrypitoisuuden aiheuttamasta laimennuksesta ympäristössä, jossa kastepiste on 40 °C T_d .

Hiilidioksidi ja turvallisuus

Hiilidioksidi on myrkytön ja palamaton kaasu. Altistuminen korkeille pitoisuuksille voi kuitenkin olla hengenvaarallista. Kun hiilidioksidikaasua tai kuivajäätä käytetään, tuotetaan, kuljetetaan tai varastoidaan, hiilidioksidipitoisuudet voivat nousta vaarallisen korkealle tasolle. Koska hiilidioksidi on hajutonta ja väritöntä, vuotoja on mahdoton havaita. Asianmukaisia antureita tarvitaan henkilöstön turvallisuuden takaamiseksi.

Eri hiilidioksiditasojen vaikutus

PITOISUUS	VAIKUTUS
350–450 ppm	Tyypillinen ilmakehän pitoisuus
600–800 ppm	Hyväksyttävä sisäilman laatu
1 000 ppm	Tyydyttävä sisäilman laatu
5 000 ppm	Keskimääräinen altistumisen raja-arvo 8 tunnin aikana
6 000–30 000 ppm	Vaara, ainoastaan lyhyt altistuminen
3 - 8 %	Nopeutunut hengitystiheys, päänsärky
> 10 %	Huonovointisuus, oksentelu, tajuttomuus
> 20 %	Nopea tajuttomuus, kuolema

VAISALA

Ota meihin yhteyttä osoitteessa www.vaisala.fi/contactus



Skannaamalla koodin saat lisätietoja aiheesta

Viite: B211228FI-B ©Vaisala 2019

Tämä materiaali on tekijänoikeussuojan alainen ja Vaisala sekä sen yksittäiset yhteistyökumppanit pidättävät kaikki tekijänoikeudet siihen. Kaikki oikeudet pidätetään. Logot ja/tai tuotenimet ovat Vaisalan tai sen yksittäisten kumppanien tavaramerkkejä. Tässä esitteessä olevien tietojen kaiken muotoinen kopiointi, siirto, jakelu tai tallentaminen ilman Vaisalalta saatua kirjallista lupaa on ehdottomasti kielletty. Kaikkia tietoja — myös teknisiä — voidaan muuttaa ilman erillistä ilmoitusta.

www.vaisala.fi