

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT
School of engineering science
Kemiantekniikan koulutusohjelma
Kandidaatin työ

Yleisimmät kaasumaiset ilmansaasteet

Sami Kontio
Lappeenrata
Syksy 2019
Ohjaaja TkT Arto Pihlajamäki

Tiivistelmä

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

Teknillinen tiedekunta

Kemiantekniikan koulutusohjelma

Sami Kontio

Yleisimmät kaasumaiset ilmansaasteet

Kandidaatintyö

2019

Työn tarkastaja: Associate prof. Mari Kallioinen

Hakusanat: Ilmansaasteet, rikkidioksidi, otsoni, typen oksidit, hiilimonoksidi, kasvihuonekaasut, ilmastonmuutos, ilmastopimus

Työssä käydään läpi yleisimpiä kaasumaisia ilmansaasteita, niiden lähteitä, ominaisuuksia sekä vaikutuksia ilmastoon, terveyteen ja luontoon. Läpikäytävät yhdisteet ovat rikkidioksidi, otsoni, typen oksidit, hiilimonoksidi, ammoniakki, rikkivety, vetysyanidi, haihtuvat orgaaniset yhdisteet sekä kasvihuonekaasut. Lisäksi käsitellään kansallinen ilmastonsuojeluohjelman sekä Kioton ja Pariisin ilmastopimusten pääkohdat ilmansaasteisiin liittyen.

Lyhenneluettelo

Ca(OH) ₂	kalsiumhydroksidi, sammutettu kalkki
CaCO ₃	kalsiumkarbonaatti
CaSO ₃	kalsiumsulfiitti
CCS	carbon capture and storage, hiilen talteenotto ja varastointi
CH ₄	metaani
CO	hiilimonoksidi, häkä
CO ₂	hiilidioksidi
GWP	globaalinen lämmityspotentiaali
HCN	vetysyanidi
H ₂ O(g)	Vesi(höyry)
H ₂ S	rikkivety
HFC	halogenoidut hiilivedyt
IPCC	hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli
Mg(OH) ₂	magnesiumhydroksidi
MgSO ₃	magnesiumsulfiitti
N ₂ O	typpioksiduuli, ilokaasu
NO ₂	typpidioksidi
N ₂ O ₃	dityppitrioksidi, typpi(III)oksidi
N ₂ O ₄	dityppitetraoksidi
HNO ₂	typpihapoke
HNO ₃	typpihappo
Na ₂ SO ₃	natriumsulfiitti
NaHSO ₃	natriumvetysulfiitti, natriumbisulfiitti
NaOH	natriumhydroksidi, lipeä
NaSO ₃	natriumsulfiitti-ioni
NH ₃	ammoniakki
NMVOC	haihtuvat orgaaniset yhdisteet pois lukien metaani
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (USA)
NO _x	typen oksidit
O ₂	happi
O ₃	otsoni

PAH	polysykliset aromaattiset hiilivedyt
PFC	perfluoratut yhdisteet
SF ₆	rikkiheksafluoridi
SO ₂	rikkidioksidi
TSR	haisevat rikkiyhdisteet
VOC	haihtuvat orgaaniset yhdisteet
ΔT	lämpötilan muutos

Sisällys

1	Puhdas ilma.....	5
2	Yleisimmät kaasumaiset ilmansaasteet.....	5
2.1	Rikkidioksidi (SO ₂).....	5
2.2	Otsoni (O ₃).....	8
2.3	Typen oksidit (NO _x).....	9
2.4	Hiilimonoksidi (CO).....	10
2.5	Ammoniakki (NH ₃).....	11
2.6	Rikkivety (H ₂ S).....	11
2.7	Vetysyanidi (HCN).....	11
2.8	Karsinogeeniset ilmansaasteet.....	11
2.9	Haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC).....	12
2.10	Kasvihuonekaasut ja ilmastonmuutos.....	12
2.10.1	Vesihöyry.....	15
2.10.2	Hiilidioksidi (CO ₂).....	16
2.10.3	Metaani (CH ₄).....	18
2.10.4	Typpioksiduuli (N ₂ O).....	19
3	Lainsäädäntö Suomessa ja ulkomailla.....	20
3.1	Kansallinen ilmastonsuojeluohjelma.....	20
3.2	Kioton ja Pariisin ilmastopöytäkirjat.....	21
4	Yhteenveto.....	21
5	Lähdeluettelo.....	22

1 Puhdas ilma

Puhdas ilma on hajutonta, väritöntä ja mautonta, joka sisältää tilavuuspitoisuuksina typpeä (78,084%), happea (20,946%), argonia (0,934%), hiilidioksidia (0,040%), sekä pieniä pitoisuuksia (alle 0,01%) muita aineita kuten heliumia, neonia, metaania ja vetyä.

Ilman saastuminen tarkoittaa kemikaalien, pienhiukkasten tai mikroskooppisten eliöiden aiheuttamaa ilman laadun pilaantumista. Yleensä saastumisen määritelmään lasketaan myös haitan aiheuttaminen ihmiselle tai muille eliöille. Ilmansaasteet aiheuttavat vuosittain 3,7 miljoonaa ennen aikaista kuolemaa maailmanlaajuisesti /1/. Suomessa vastaava luku on 1600-2000 kuolemaa /2/.

Saasteiden pitoisuus ilmassa (tietyissä paikassa) riippuu päästöjen määrästä, tuulen suunnasta ja nopeudesta, sekä ilmakehän stabiiliudesta, joka määrää, kuinka paksuun ilmakerrokseen saasteet sekoittuvat.

2 Yleisimmät kaasumaiset ilmansaasteet

Primäärisillä ilmansaasteilla tarkoitetaan suoraan lähteestä ilmakehään laskettuja päästöjä. Esimerkkeinä mainittakoon dieselmoottorin pakokaasut ja voimalaitoksen rikkidioksidipäästöt. Vastavuoroisesti sekundäärisillä päästöillä tarkoitetaan saasteita, joita ei suoranaisesti lasketa ilmaan, vaan ne muodostuvat reagoidessaan ilmakehässä. Esimerkiksi rikkihappoa ja typpihappoa muodostuu, kun rikkidioksidi ja typpidioksidi hapettuvat ilman hapen vaikutuksesta. /3/

Yleisimmät kaasumaiset ilmansaasteet ovat rikkidioksidi (SO_2), Typen oksidit (NO_x ja N_2O), haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC), otsoni (O_3), hiilimonoksidi (CO), vetysyanidi (HCN), haisevat rikkiyhdisteet (TSR) sekä kasvihuonekaasut. Suurina pitoisuuksina SO_2 , NO_x , CO, O_3 , HCN ja VOC ovat ihmiselle myrkyllisiä.

2.1 Rikkidioksidi (SO_2)

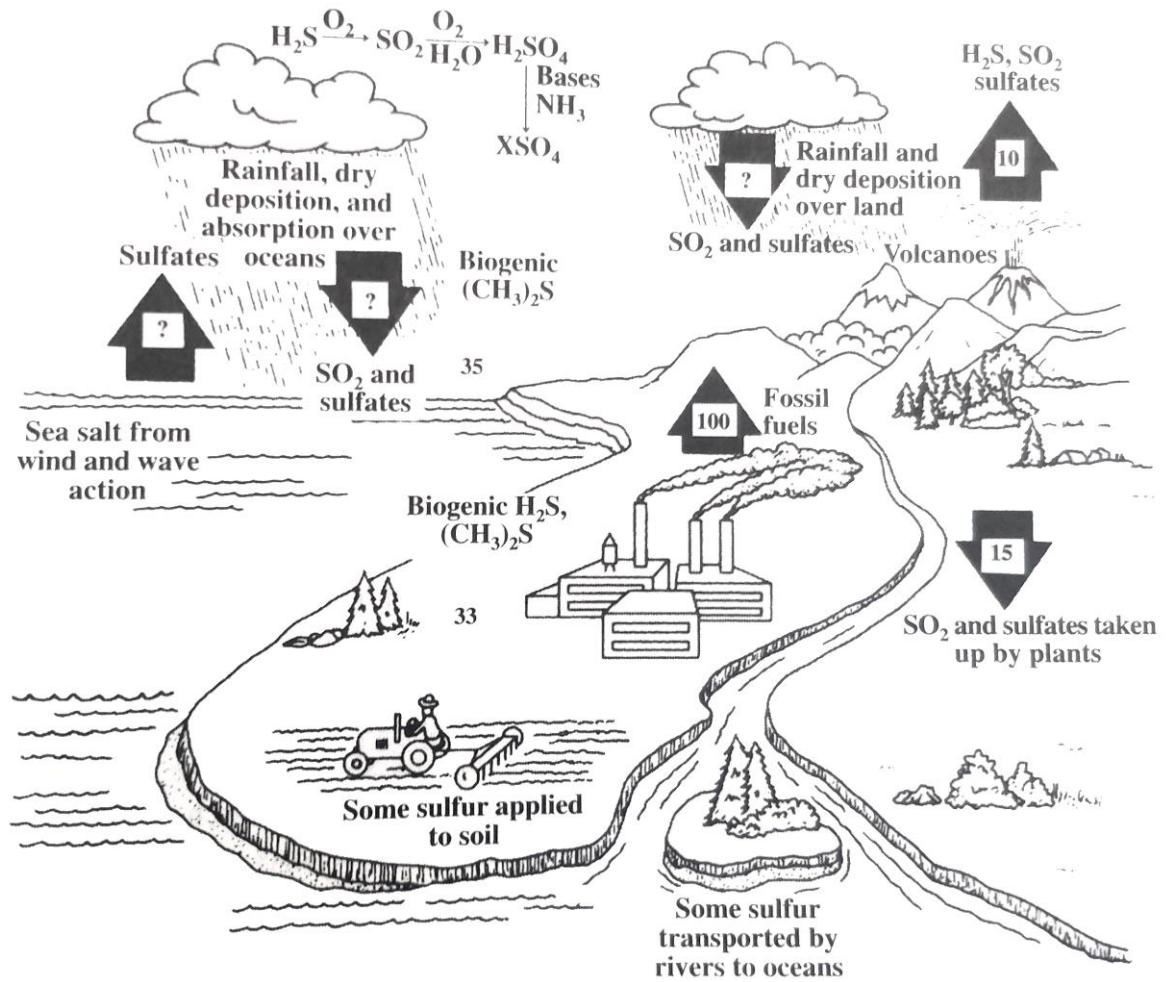
Rikkidioksidi on yksi vanhimmista ilmansaasteista. Se oli yksi Britannian hiilisavusumun pääkomponenteista ennen 1956 Clean Air Act -lakia. Nykyään fossiilista polttoainetta käyttävät voimalaitokset ovat pääasiallinen rikkidioksidin lähde. Myös tulivuoren

purkaukset aiheuttavat rikkidioksidipäästöjä.

Taulukko I Polttoaineiden tyypillisiä rikkipitoisuuksia sekä rikkidioksidin ominaispäästöjä /4/.

Polttoaine	Rikkipitoisuus [m-%]	Rikkipäästö [mgSO₂/MJ]
kivihiili	0,2 - 5	150 - 4000
puu	< 0,05	< 130
turve	0,05 - 0,5	50 - 500
maakaasu	0	0
kevyt polttoöljy	0,05 - 0,5	25 - 250
raskas polttoöljy	1 - 4	500 - 2000

Rikkidioksidi liukenee voimakkaasti veteen muodostaen lopulta rikkihappoa. Rikkihappoa liukenee pilvien sisältämiin vesipisaroihin, jotka satavat alas vesistöjä ja maaperää happamoittavana ja rakennuksien materiaaleja syövyttävänä happosateena. Haposade aiheuttaa haittaa myös ihmiselle ja muille eliöille /5/. Hengitettynä rikkidioksidi jää vesiliukoisuutensa ansiosta enimmäkseen kurkun ja nielun kosteisiin limakalvoihin, mutta osa päätyy kuitenkin syväälle keuhkoihin ja aiheuttaa kudonvaurioita. Se ärsyttää hengitysteitä ja suuria keuhkoputkia /3/. WHO:n antamat ohjeraja-arvot rikkidioksidin hengitysilmapitoisuuksille ovat 20 µg/m³ vuorokaudessa ja 500 µg/m³ 10 minuutissa /6/. 500 ppm rikkidioksidipitoisuus on ihmiselle tappava. /7/



Kuva 1. Globaali ilmakehän rikin kiertokulku. Rikkivirtojen nuolien luvut ovat miljoonaa tonnia per vuosi. Kysymysmerkillä merkityt virrat ovat epävarmoja, mutta suuria, todennäköisesti noin 100 miljoonaa tonnia per vuosi. /8/

Rikin ja rikkioksidien poistoon polttoaineesta sekä pakokaasuista käytetään monia prosesseja, joista suurin osa keskittyy kivihiileen, koska se on rikkipäästöjen suurin lähde. Taulukossa II on esitetty 5 erilaista savukaasujen rikinpoistomenetelmää, sekä niiden hyvät ja huonot puolet.

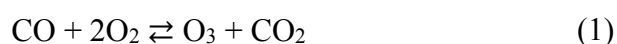
TAULUKKO II

Pääasialliset savukaasujen pesumenetelmät. /8/

Prosessi	Reaktiot	Erityiset hyvät ja huonot puolet
Kalkkilietepesu	$\text{Ca(OH)}_2 + \text{SO}_2 \rightleftharpoons \text{CaSO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	Jopa 200kg kalkkia tarvitaan per tonni hiiltä, tuottaa suuren määrän jätettä.
Kalkkikivipesu	$\text{CaCO}_3 + \text{SO}_2 \rightleftharpoons \text{CaSO}_3 + \text{CO}_2(\text{g})$	Alempi pH kuin kalkkilietteellä, tehottomampi.
Magnesiumhydroksidipesu	$\text{Mg(OH)}_2 + \text{SO}_2 \rightleftharpoons \text{MgSO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	Sorbentti voidaan regeneroida tarvittaessa off-site
Natriumemäspesu	$\text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 \rightleftharpoons 2\text{NaHSO}_3$ $2\text{NaHSO}_3 + \Delta T \rightleftharpoons \text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2$	Ei teknillisiä rajoituksia, isot vuosikustannukset.
Kaksoisalkali	$2\text{NaOH} + \text{SO}_2 \rightleftharpoons \text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ $\text{Ca(OH)}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_3 \rightleftharpoons \text{CaSO}_3(\text{s}) + 2\text{NaOH}$ (NaOH regeneraatio)	Sallii kalliin natriumalkaliliuoksen regeneraation halvalla kalkilla.

2.2 Otsoni (O₃)

Kun otsonista puhutaan ilmansaasteena, tarkoitetaan alailmakehään kertynyttä otsonia. Sillä on huomattava ilmaston lämpenemistä aiheuttava vaikutus. Lisäksi otsoni aiheuttaa hengenahdistusta astmaatikoilla ja aiheuttaa pitkään altistuttaessa astmaa sekä sydän- ja verisuonitauteja /3/. Suomessa pitoisuudet ovat korkeimmat maaseudun tausta-alueilla. WHO:n antama ohjeraja-arvo hengitysilman otsonipitoisuudelle on 100µg/m³, 8h päivittäinen maksimialtistus /7/. Otsoni aiheuttaa myös materiaalivahinkoja, erityisesti kumille. Suurienerginen ultraviolettivalo, jota tarvitaan happimolekyylin pilkkomiseen happiatomien aikaansaamiseksi ei läpäise ilmakehää troposfääriin asti, joten alailmakehän otsoni muodostuu useamman vaiheen ketjureaktiolla. Nettoreaktio on muotoa: /8/



Hiilimonoksidipäästöillä on siis suuri merkitys alailmakehän otsonin muodostumiseen.

2.3 Typen oksidit (NO_x)

Ilmakehästä löydetään yleensä kolmea typen oksidia: typpioksiduuli (N₂O), typpioksidia (NO) ja typpidioksidia (NO₂). Typen yhdisteiden kemia ilmakehässä on tärkeässä osassa mm. fotokemiallisen savusumun ja haposateen muodostuksen ja otsonikadon kannalta.

Typen oksidien päälähteet ovat liikenne ja lämmitys. Polttomoottoreissa typpioksidia muodostuu hyvin korkeissa lämpötiloissa seuraavalla reaktiolla:



Typpioksidia on vähemmän myrkyllinen kuin typpidioksidi. Se syrjäyttää hapen verestä hiilimonoksidin tavoin, mutta saastuneessa ilmassa typpioksidipitoisuudet ovat yleensä huomattavasti pienemmät kuin hiilimonoksidilla, joten sen hemoglobiinivaikutus jää pieneksi.

Typpidioksidi sen sijaan on hyvin haitallinen ihmiselle. Se ei ole niin liukoinen veteen kuin rikkidioksidi, joten se päätyy syvemmälle keuhkoihin hengitettynä. Tutkimukset osoittavat päivittäisen altistumisen aiheuttavan yleistä sekä kardiovaskulaarisen kuolleisuuden nousua. WHO:n antamat ohjeraja-arvot typpidioksidin hengitysilmapitoisuuksille ovat vuosittaiselle keskimääräiselle pitoisuudelle: 40µg/m³ ja yhden tunnin altistumispuoleisuudelle 200µg/m³ /7/. Ihmisen altistaminen 150-200 ppm pitoisuudelle aiheuttaa kuoleman noin 3-5 viikossa.

Typen oksidien muodostus savukaasuissa on yleensä välillä 50-1000 ppm. typpioksidin muodostumista edistävät korkea lämpötila ja ylimääräinen happi. Liekin lämpötilaa pienentämällä sekä lisäämällä kierrätettyä savukaasua, viileää ilmaa tai inerttiä kaasua saadaan typpioksidin muodostus estettyä. Valitettavasti tämä pienentää energiakonversion tehokkuutta. Vähä-ylimäärä-happisella palamisella saadaan vähennettyä typen oksideja korkeassa lämpötilassa tehokkaasti, mutta se aiheuttaa epätäydellistä palamista, joka taas tuottaa hiilivetyjä, nokea ja häkää. Nämä ongelmat voidaan ratkaista kaksiosaisella

polttoprosessilla: ensimmäinen vaihe, jossa polttoaine poltetaan suhteellisen korkeassa lämpötilassa, mutta jossa happea on stoikiometrisesti vähemmän, esimerkiksi noin 90-95% stoikiometrisestä hapentarpeesta. Näin estetään typpioksidin muodostuminen. Toisessa vaiheessa polttoprosessia jatketaan pienemmässä lämpötilassa ja ylimääräilmalla, jolloin alempi lämpötila estää typpioksidin muodostuksen. Näin typpioksidipäästöjä voidaan vähentää jopa 90%. /8/

Typen oksidien poistaminen savukaasuista on ongelmallista, koska typpioksidi, joka on savukaasuissa pääasiallinen typen oksidi, liukenee huonosti veteen. Vaihtoehtoina ovat katalyyttinen hajottaminen, katalyyttinen pelkistäminen ja sorptio nesteillä tai kiinteillä aineilla. Erottamista helpottaa typpioksidin hapettaminen vesiliukoisempaan muotoon kuten NO_2 , N_2O_3 , N_2O_4 , HNO_2 ja HNO_3 . /8/

2.4 Hiilimonoksidi (CO)

Hiilimonoksidi eli häkä on tappava ilmansaaste. Suomessa kuolee keskimäärin 10-20 ihmistä vuodessa häkämyrkytykseen (tilastokeskus). Verenkiertoon päästessään häkä sitoutuu hemoglobiiniin samoin kuin happi, mutta 200 kertaa tehokkaammin, jolloin happi syrjäytyy verenkierrosta ja ihminen kuolee hapenpuutteeseen. Ulkoilmassa häkä voi olla vaarallisella tasolla esimerkiksi tiheään asutuilla kaupunkialueilla pahimpiin ruuhka-aikoihin, jolloin ilman häkäpitoisuus voi nousta jopa 50-100 ppm tasolle, joka on jo ihmiselle vaarallinen pitoisuus. Kaupunkien häkäpitoisuus on suoraan verrannollinen alueen liikennemäärään, ja kääntäen verrannollinen tuulen nopeuteen. Sisäilman häkäpitoisuus voi lisäksi nousta korkealle esimerkiksi epätäydellisen palamisen tai tupakoinnin takia. /3/ /8/

Häkä on myös tärkeässä asemassa toposfäärin otsonin muodostumiseen (ks. kappale 2.2).

Koska polttomoottorit ovat suurin syy ihmisen tuottaman hiilimonoksidin syntymiselle, on autojen polttoainesäädöt otettu tarkastelun kohteeksi. Syöttämällä moottoriin laihempaa polttoaine-ilma-seosta saadaan palamisreaktion häkäpäästöt hallintaan. Painosuhteella ilma:polttoaine 16:1 polttomoottori tuottaa enää hyvin vähän häkää /8/. Tämä tosin lisää

typen oksidien määrää pakokaasuissa, mutta niitä voidaan vähentää tehokkaasti pakokaasun kierrättämisellä, ilmastamisella sekä katalysaattoreilla /9/.

2.5 Ammoniakki (NH₃)

Ammoniakin vaikutukset ilmansaasteena ovat moninaiset. Se on terveysuhka pienhiukkasten muodostumisten kautta, aiheuttaa sekä liikatyppisyyttä että happamuutta maaperässä, sekä osallistuu kasvihuoneilmiöön epäsuorasti typpioksidin muodostuksessa ja aiheuttaa rehevöitymistä vesistöissä. Ammoniakin päälähte on maatalous /10/.

2.6 Rikkivety (H₂S)

Kemiallinen puunjalostus ja muu kemianteollisuus ovat suurin ihmisen aiheuttaman rikkivedyn lähde ilmakehässä. Nykyään haisevat rikkiyhdisteet pyritään hävittämään polttamalla. Biokaasulaitosten rikkivety päästöjä voidaan vähentää ohjaamalla pieni määrä ilmaa biokaasureaktorin kaasutilaan /11/. Rikkivedyn poistoon voidaan käyttää myös adsorptiota rautaionien tai aktiivihiilen avulla /12/. Luonnossa rikkivetyä muodostuu rikkihappoisten orgaanisten yhdisteiden hajotessa.

2.7 Vetycyanidi (HCN)

Syaaniyhdisteiden myrkyllisyys ja ympäristövaikutukset tunnetaan hyvin. Silti niitä käytetään edelleen kaivostoiminnassa sekä metalli- ja kemianteollisuudessa. Suurin vetycyanidin lähde on kuitenkin tupakansavu. Muita lähteitä ovat synteettisten materiaalien, villan ja silkin palaminen /13/.

2.8 Karsinogeeniset ilmansaasteet

Kaupunki-ilma sisältää usein lukuisia karsinogeenisiä ilmansaasteita. Näihin kuuluvat mm. bentseeni, 1,3-butadieeni ja polysykliset aromaattiset hiilivedyt (PAH). Lisäksi pieniä määriä epäorgaanisia karsinogeneja, kuten arsenikkia esiintyy. /3/

2.9 Haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC)

Haihtuvat orgaaniset yhdisteet vaikuttavat alailmakehän otsonin muodostumiseen ja sekundääristen hiukkasten muodostumiseen. Haihtuvia orgaanisia yhdisteitä syntyy epätäydellisessä palamisessa (erityisesti pienissä tulisijoissa), liikenteessä, teollisuuden prosesseissa, liuottimien, liimojen, maalien ja painovärien käytössä sekä bensiinin jakelussa /2/. VOC-yhdisteitä pidetään terveydelle haitallisina ja karsinogeenisina, ainakin suurina pitoisuuksina. Oireina ovat ainakin silmien ja limakalvojen ärsytys, hajutuntemukset ja päänsärky /13/. VOC-yhdisteistä aiheutuvat korkeat otsonipitoisuudet voivat aiheuttaa hetkellisiä muutoksia keuhkojen toimintaan.

2.10 Kasvihuonekaasut ja ilmastonmuutos

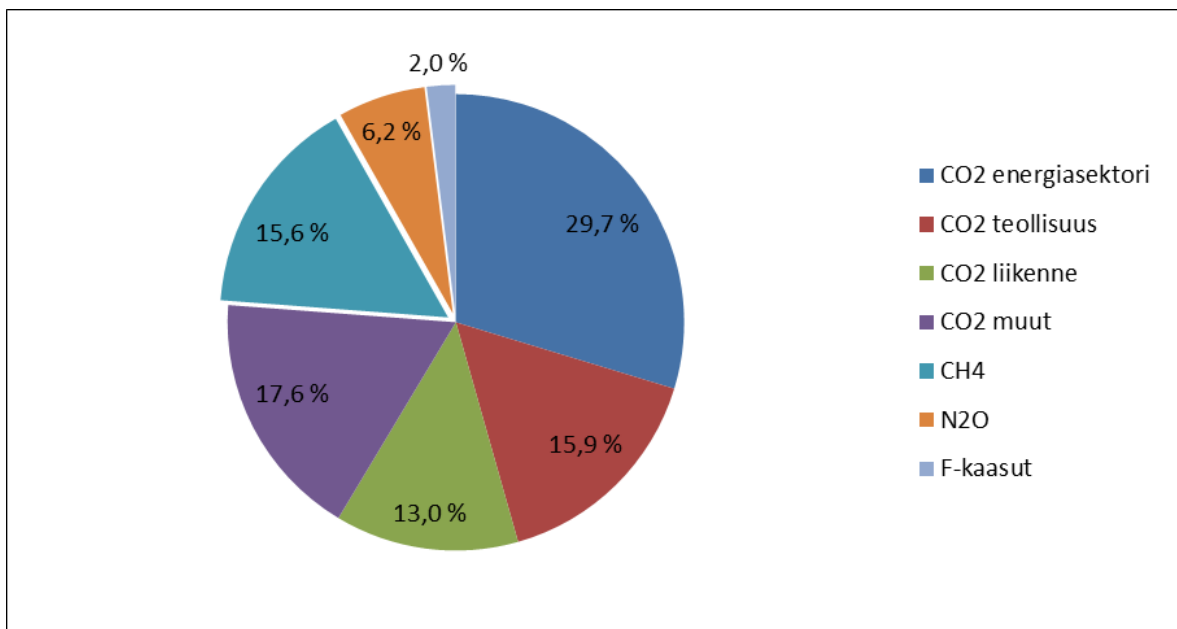
Kasvihuoneilmiö maapallolla on ihmiselle elintärkeä. Ilman sitä keskimääräinen lämpötila olisi noin 30 astetta alhaisempi, tehden elämästä mahdottoman. Kasvihuonekaasujen toiminta ilmakehässä muistuttaa kasvihuoneessa olevaa lasikattoa. Lämmittävä auringonvalo pääsee helposti sisään, mutta ilmakehästä lähtevää infrapuna- eli lämpösäteilyä huonosti ulos. Maasta ulos päin suuntautuvaa lämpösäteilyä absorboituu osin kasvihuonekaasuihin, jotka palauttavat osan lämpöenergiasta takaisin maanpinnalle.

Viime vuosina havaittu trendi lämpenevästä ilmastosta tuottaa vakavia ongelmia tulevana vuosikymmeninä. Kuivuus ja aavikoituminen, jäätiköiden ja ikeiroudan sulaminen, merenpinnan nousu, hirmumyrskyjen yleistyminen, massiiviset maastopalot ja tulvat ovat ilmastonmuutoksen seurauksia, ja kasvihuonekaasut ja niiden pitoisuuksien muutos ilmakehässä vaikuttavat osaltaan ilmastonmuutoksen rajuuteen ja nopeuteen.

Kasvihuonekaasuiksi lasketaan vesihöyry ($\text{H}_2\text{O}_{(g)}$), hiilidioksidi (CO_2), metaani (CH_4), typpioksiduuli (N_2O), otsoni (O_3) sekä halogenoidut hiilivedyt (HFC), perfluoratut yhdisteet (PFC) ja rikkiheksafluoridi (SF_6) joista käytetään yhteistä nimitystä F-kaasut. Vesihöyry on Ilmaston merkittävin kasvihuonekaasu. Maapallon kokonaisilmasto vaikuttaa merkittävästi

sen määrään ilmakehässä. Kasvihuoneilmiötä voimistavista kasvihuonekaasuista merkittävin ihmisen toiminnan tuotos on hiilidioksidi. Hiilidioksidin osuus on noin kolme neljännestä ihmisen aiheuttamista kasvihuonekaasujen kokonaispäästöistä.

Kuvassa 2 on esitetty ihmisen toiminnasta peräisin olevien kasvihuonekaasupäästöjen prosenttiosuuksia maailmanlaajuisesti vuodelta 2010. Näistä päästöistä leijonanosan muodostaa hiilidioksidi, kaikista päästöistä yhteensä 76 prosenttia. /14/



Kuva 2. Kasvihuonekaasupäästöjen lähteet vuonna 2010 /14/

Kasvihuonekaasun vaikutus ilmastoon riippuu sen eliniästä ilmakehässä, pitoisuudesta sekä voimakkuudesta, josta käytetään termiä globaalinen lämmityspotentiaali. Globaalinen lämmityspotentiaali (ns. GWP100-kerroin) luonnehtii kasvihuonekaasun sadan vuoden aikana aiheuttamaa lämmitysvaikutusta ilmastoon verrattuna hiilidioksidiin. Hiilidioksidin GWP100-kerroin on 1. Taulukossa III on esitetty kasvihuonekaasujen elinikä ja GWP-kertoimia. Otsoni on jätetty taulukosta pois, koska sen elinikä alailmakehässä on noin 22 päivää, joten GWP-100 kerroin jää mitättömän pieneksi.

TAULUKKO III Kioton pöytäkirjan kasvihuonekaasujen elinikä ja lämmityspotentiaali
/16/

Kaasu	Elinikä (vuosia)	GWP100
Hiilidioksidi	50-200	1
Metaani	12	25
Typpioksiduuli	114	298
HFC-yhdisteet	1,4-270	124-14 800
PFC-yhdisteet	1000-50 000	7390-12 200
Rikkiheksafluoridi	3 200	22 800

TAULUKKO IV Ilmaston lämpenemistä voimistavia ja hillitseviä palauteilmiöitä. /17/

VOIMISTAVAT, kun ilmasto lämpenee ja hiilidioksidipitoisuus kasvaa	
Vesihöyryn määrä ilmakehässä kasvaa	→ kasvihuoneilmiö voimistuu
Jäätiköiden pinta-ala pienenee	→ albedo* pienenee
Orgaanisen aineen hajoaminen ja soluhengitys lisääntyvät	→ hiilidioksidia vapautuu ilmakehään
Lämpötilan noustessa veden kyky sitoa hiilidioksidia pienenee	→ hiilidioksidia vapautuu meristä
Ikirouta sulaa	→ metaania vapautuu ilmakehään
Merenpohja lämpenee	→ metaanihydraatit sulavat ja metaania vapautuu
Lämpötilan noustessa veden kyky sitoa hiilidioksidia pienenee	→ hiilidioksidia vapautuu meristä
(Sade)metsän tuhoutuminen	→ yhteyttäminen vähenee, maaperän hiiltä vapautuu
Aavikoituminen	→ yhteyttäminen vähenee, maaperän hiiltä vapautuu
HILLITSEVÄT, kun ilman lämpötila ja hiilidioksidipitoisuus kasvavat	
Lämpösäteilyn intensiteetti kasvaa lämpötilan noustessa	→ enemmän lämpösäteilyä karkaa avaruuteen
Yhteyttäminen voimistuu	→ hiilidioksidia sitoutuu kasvillisuuteen → hiilidioksidia sitoutuu kasvillisuuteen (toisaalta albedo pienenee, voimistava vaikutus)
Länsi-Afrikan monsuunin voimistuminen	
Aavikoituminen	→ albedo kasvaa, vaalea aavikko heijastaa auringonsäteilyä enemmän kuin tumma metsä
Epävarmoja, voi olla sekä voimistavia, että hillitseviä palauteilmiöitä	
Muutokset merivirroissa	→ esimerkiksi korkeilla leveysasteilla viilenee ja matalilla lämpenee → esimerkiksi alapilvien lisääntymisen nettovaikutus olisi ilmaston lämpenemistä hillitsevä ja yläpilvien lisääntymisen nettovaikutus sen sijaan ilmaston lämpenemistä voimistava
Muutokset pilvisyydessä	

* Albedo on jonkin kappaleen kyky heijastaa siihen osuvaa säteilyä. Tumman kappaleen albedo on pieni ja vaalean suuri.

2.10.1 Vesihöyry

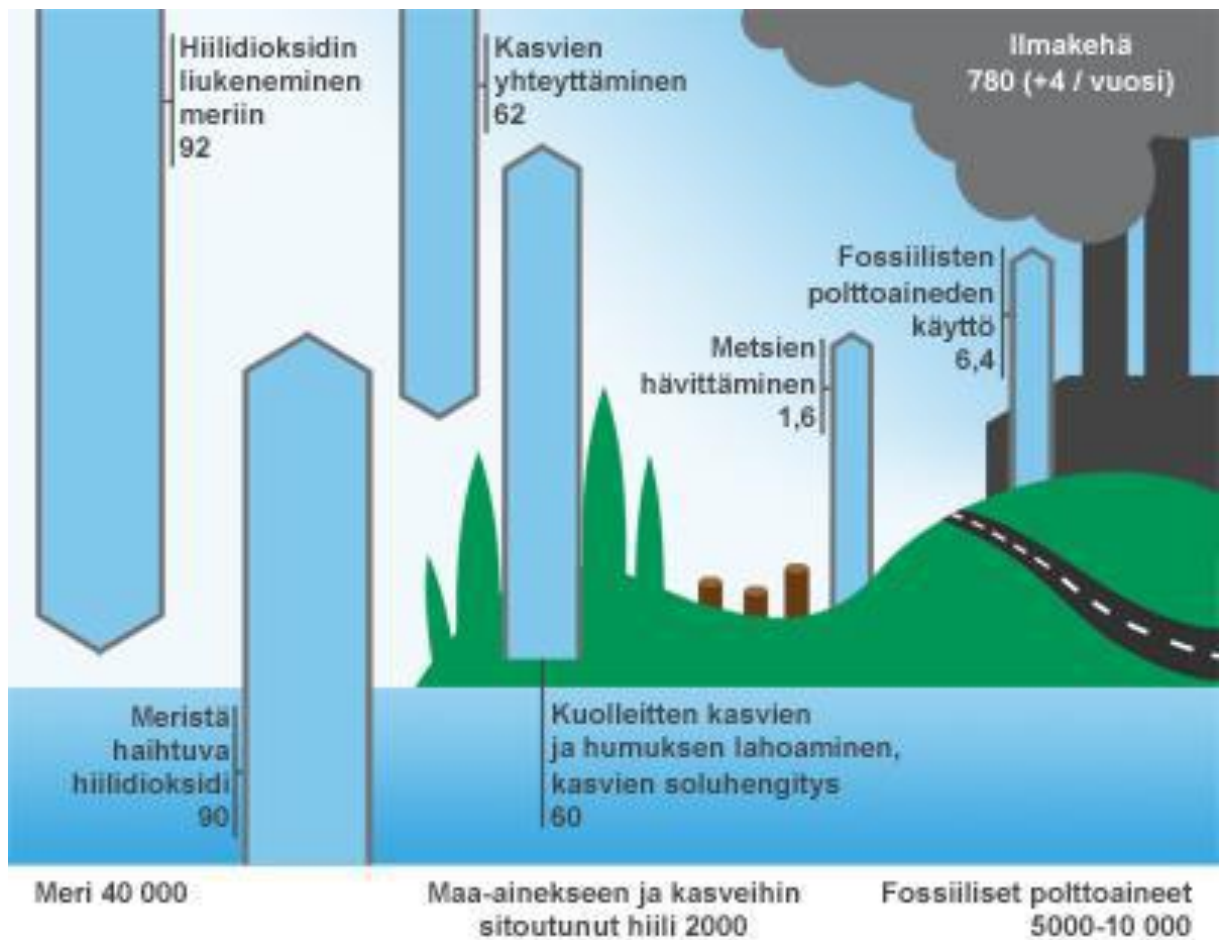
Kasvihuonekaasuista yleisin on vesihöyry ja se on myös erittäin tärkeä tekijä luonnollisessa kasvihuoneilmiössä. Tarkkaa vesihöyryn määrää on vaikea määrittellä. Erään arvion mukaan

sen osuus kaikista kasvihuonekaasuista on noin 80 massaprosenttia ja sen vaikutus kasvihuoneilmiöön on noin 66–85 prosenttia /18/. Vesihöyry ei itsessään aiheuta ilmaston lämpenemistä, johtuen sen verrattain lyhyestä ajallisesta kestosta ilmakehässä sekä siitä, että ilmakehän kapasiteetti vesihöyryn sitomiseen eri lämpötiloissa on rajallinen. Se vaikuttaa ilmastonmuutokseen lämmittävästi palauteilmiön kautta; kun muut kasvihuonekaasut, tärkein näistä on hiilidioksidi, lämmittävät ilmakehää, ilmakehä sitoo enemmän vesihöyryä, joka on itsessään siis voimakas kasvihuonekaasu. Näin kasvihuoneilmiö vahvistuu yhä lisää. /14/

Ihmisen toiminta lisää vesihöyryn määrää ilmakehäämme enimmäkseen epäsuorasti palauteilmiön avustamana, mutta on myös suoria lähteitä. Esimerkkinä mainittakoon suurissa korkeuksissa liikkuvien lentokoneiden polttoaineen palamisesta tuleva vesihöyry sekä metaanipäästöjen reagoiminen vedeksi ja hiilidioksidiksi ilmakehässä. Nämä päästöt ovat kuitenkin merkitykseltään hyvin vähäisiä, joskin lentoliikenteen määrän kasvaessa niiden vaikutus kokonaiskuvaan voi olla suurempi tulevaisuudessa. /14/

2.10.2 Hiilidioksidi (CO₂)

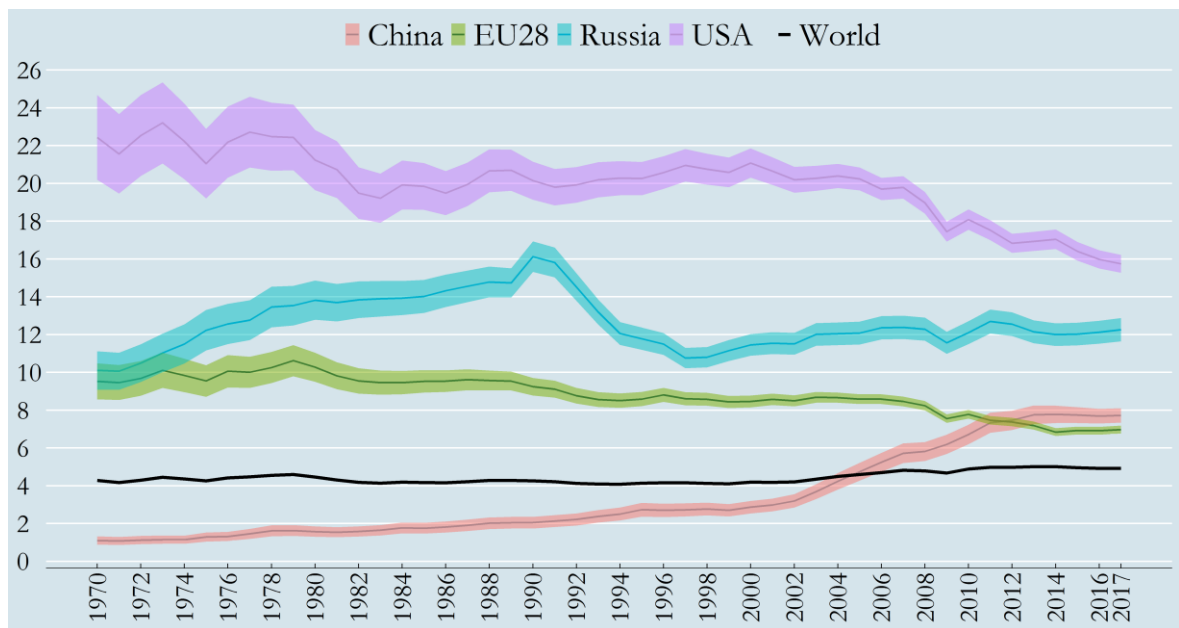
NTP-tilassa hiilidioksidi (CO₂) on väritön ja hajuton kaasu, joka ei ole myrkyllinen. Ilmiselle vaarallinen siitä tulee suurissa pitoisuuksissa, jolloin se syrjäyttää hapen. Kuvassa 3 on esitetty maapallon hiilikierron suurimpia kiertokulkuja.



Kuva 3. Hiilen kiertokulku maapallolla. Yksikkönä on käytetty gigatonnia hiiltä. /14/

Suurin ihmisten toiminnasta aiheutuva hiilidioksidipäästöjen lähde on fossiilisten polttoaineiden käyttö. Fossiiliset polttoaineet muodostivat 90 prosenttia kaikista hiilidioksidipäästöistä vuonna 2012, jos mukaan ei lasketa metsien kaatoa ja muuta maankäyttöä. Sähköntuotanto kuluttaa suurimman osa fossiilisista polttoaineista.

Ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden mittaaminen luotettavasti on tehtävä kaukana teollisesta toiminnasta. Luotettavia mittausalueita ovat mm. etelänapamanner ja Mauna Loa -vuori Havajilla. Jo useiden vuosikymmenten ajan tehdyt mittaukset osoittivat ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden nousevan alkuun noin 1 ppm / vuosi. Viime vuosina pitoisuuden nousu on kiihtynyt. Maailmanlaajuiset hiilidioksidipäästöt vuonna 2017 nousivat 1,2% 37,1 gigatonniin. Suurimmat päästöjentuottajamaat olivat Kiina 29%, USA 14%, EU 9,6%, Intia 6,6% ja Venäjä 4,8% /19/

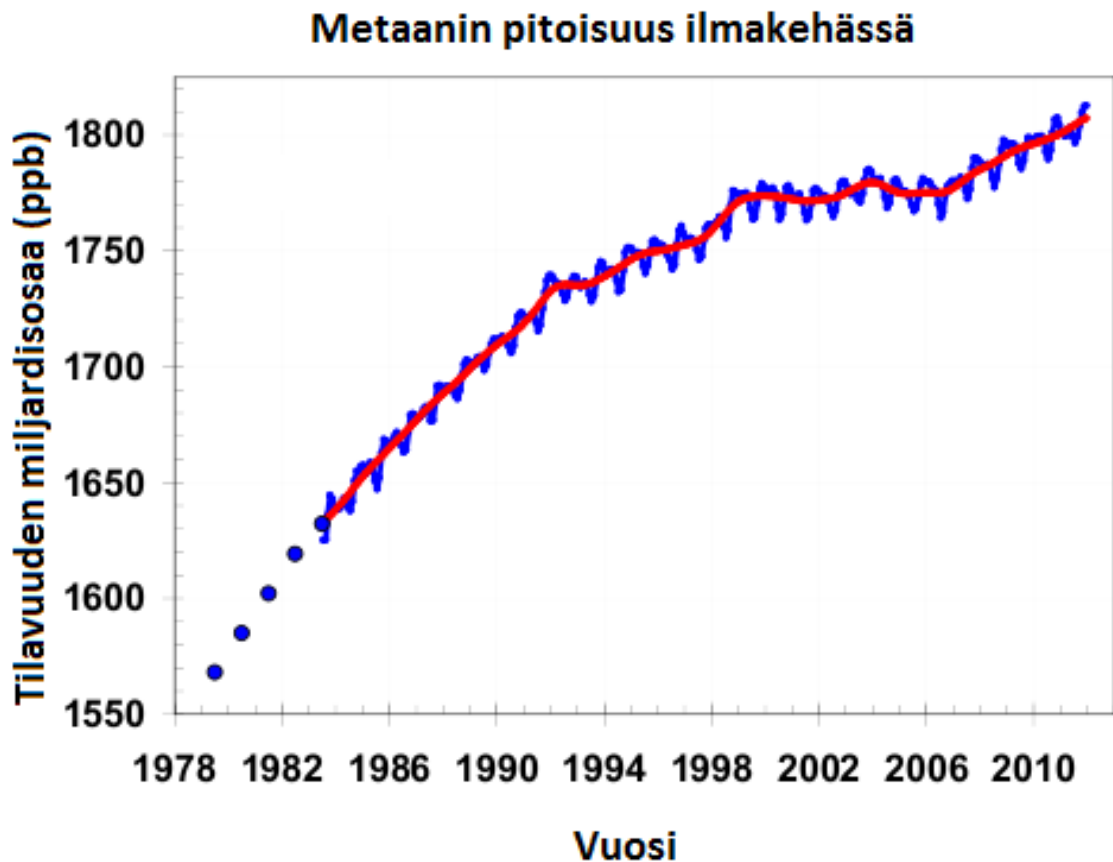


Kuva 4. Hiilidioksidipäästöt per capita per vuosi. [tonnia CO₂ / hlö / vuosi]. Epävarmuustekijät huomioitu värillisillä kentillä. /19/

Hiilidioksidin talteenottoa ja varastointia (Carbon capture and storage, CCS) on tutkittu, ja voimalaitoksille on kehitetty muutamia hiilidioksidin talteenottoratkaisuja. Voimalaitosten lisäksi CCS:ää on mahdollista soveltaa myös prosessiteollisuudessa ja polttoainejalostuksessa. Kaikki talteenotto prosessit kuluttavat energiaa ja heikentävät laitoksen hyötysuhdetta. Talteenotto on siksi myös kallein vaihe CCS-ketjussa nykyteknologialla /20/.

2.10.3 Metaani (CH₄)

Metaani on ihmisen tuottamista kasvihuonekaasuista hiilidioksidin jälkeen toiseksi tärkein ilmastoon lämmittäjä. Metaania syntyy orgaanisten aineiden – esimerkiksi lannan, jätevesilietteen tai biohajoavat jätteen – mätänemisen ja mädätyksen yhteydessä. Kaatopaikat ovat suurin metaanipäästöjen lähde (tilastokeskus). Metaani on selvästi voimakkaampi kasvihuonekaasu, kuin hiilidioksidi, mutta sen määrä ilmakehässä on paljon pienempi ja se hajoaa auringonvalon vaikutuksesta vedeksi ja hiilidioksidiksi noin 12 vuodessa. Ilmankehän metaanipitoisuus on noussut 150% vuodesta 1750 vuoteen 2011. /21/ Suuren riskin tuottaa Siperian ikeroudan alueella olevat massiiviset (noin 70 miljardia tonnia) metaanivarannot, jotka ilmastomuutoksen takia saattavat vapautua maaperästä.



Kuva 5. NOAA:n maailmanlaajuisen mittausverkoston mittausten perusteella laskettu metaanin keskimääräinen pitoisuus ilmakehässä. /21/

2.10.4 Typpioksiduuli (N₂O)

Typpioksiduuli eli ilokaasu on typen oksidi, mutta sitä ei perinteisesti lasketa mukaan NO_x-merkinnällä ilmaistaviin typen oksideihin (NO, NO₂). Tämä siitä syystä, että ilokaasulla ei ole samanlaisia haittavaikutuksia kuin niillä. Typpioksiduulin pääasialliset lähteet ovat maatalous lannoitteineen sekä kunnallinen jätevedenkäsittely. Myös liikenteen päästöt sisältävät sitä, mutta sen pitoisuuden mittaaminen pakokaasuista on ollut hankalaa. Typpioksiduuli on voimakas kasvihuonekaasu ja siksi siihen on alettu kiinnittää enemmän huomiota. Myös analyysitekniikan paraneminen on osaltaan myötä vaikuttanut typpioksiduulipäästöjen merkittävyyden lisääntymiseen. Typpioksiduuli on suurelta osin katalysaattoriautojen ongelma. Sitä syntyy katalysaattorissa, kun katalysaattori ei ole vielä

tarpeeksi lämmin. Katalysaattoriautojen N₂O-päästöt ovat noin kymmenkertainen muihin autoihin verrattuna. /21/

3 Lainsäädäntö Suomessa ja ulkomailla

1960-luvulla ilmastonmuutoksen tutkimus alkoi ja vähitellen myös kansainvälinen politiikka kiinnostui aiheesta. Merkittävä teko ilmastonmuutoksen tutkimuksessa tehtiin, kun Maailman ilmatieteen järjestö (WMO) ja YK:n ympäristöjärjestö (UNEP) perustivat poliittisen päätöksenteon tueksi Hallitustenvälisen ilmastonmuutospaneelin (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change) vuonna 1988. Sen tehtävänä on arvioida ilmastonmuutoksen ja sen vaikutusten jokaista osa-aluetta tieteelliseltä pohjalta ja muodostaa mahdollisia ja realistisia toimenpiteitä ilmastonmuutoksen vastustamiseksi /16/.

3.1 Kansallinen ilmastosuojeluohjelma

Ympäristöministeriö julkaisi kesällä 2019 Kansallinen ilmastosuojeluohjelma 2030 – julkaisun koskien Suomen ilmastosuojelupolitiikkaa. Euroopan Unionin päästökattodirektiivi (2016/2284) edellyttää, että jäsenmaat vähentävät kaasumaisista saasteista rikkidioksidin, typen oksidien, ammoniakkin ja haihtuvien orgaanisten yhdisteiden pois lukien metaanipäästöt (NMVOC) päästöjä. Velvoitteet ovat jatkoa ensimmäisen päästökattodirektiivin mukaisille päästöjen vähennysvelvoitteille. Direktiivin tavoitteena on, että päästövähennysten ansiosta ilman epäpuhtauksien aiheuttamat ennenaikaiset kuolemat Euroopassa vähenisivät lähes puolella vuoteen 2030 mennessä verrattuna vuoden 2005 tilanteeseen. Direktiivi edellyttää, että jäsenmaat laativat kansallisen ilmastosuojeluohjelman päästöjen vähentämisestä. Päästökattodirektiivi asettaa Suomelle taulukon V mukaiset päästövähennysvelvoitteet /2/. EU ei säädi hiilidioksidin päästövähennyksistä kansainvälisten sopimusten takia.

TAULUKKO V. Suomen päästövähennysvelvoitteet /2/

Epäpuhtaus	Vanhat velvoitteet v. 2010	Uusien velvoitteiden perusteena olevat v. 2005 päästöt kilotonneina	Uudet velvoitteet v. 2020–2029	Uudet velvoitteet v. 2030 alkaen
SO ₂	110kt	70kt	-30% (49 kt)	-34% (46,2 kt)
NO _x	170kt	205kt	-35 % (133,3 kt)	-47% (108,7 kt)
NMVOC	130kt	145kt	-35% (94,3 kt)	-48% (75,2 kt)
NH ₃	31kt	37kt	-20 % (31 kt)	-20% (31 kt)

3.2 Kioton ja Pariisin ilmastopimukset

Ihmisten huolestuminen ilmastonmuutoksesta on saanut aikaan kansainvälisiä sopimuksia kasvihuonekaasupäästöjen rajoittamiseksi. EU-maat ja siten myös Suomi ovat sitoutuneet YK:n puitesopimukseen ja sen noudattamiseen ilmastonmuutoksesta, vaikka kaikki suurimmatkaan päästövaltioidet ovat jättäneet sopimuksen ratifioimatta. Kioton pöytäkirjassa, joka tarkoittaa puitesopimusta, EU sitoutui vähentämään kokonaispäästöjä koskien kuutta eri kasvihuonekaasua aikavälillä 2008–2012 vuoteen 1990 verrattuna yhteensä 8 prosenttia /14/.

Pariisin sopimuksen tavoitteena on pitää maapallon keskilämpötilan nousu selvästi alle kahdessa celsiusasteessa, pyrkien rajoittamaan keskilämpötilan nousu 1,5 celsiusasteeseen, suhteessa esiteolliseen aikaan, vahvistaa sopeutumiskykyä ja ilmastokestävyyttä sekä suunnata rahoitusvirrat kohti vähäpäästöistä kehitystä. Pariisin sopimuksen kansainvälinen voimaantulo edellyttää, että sopimukseen on sitoutunut vähintään 55 osapuolta, joiden yhteenlaskettu osuus maailmanlaajuisista kasvihuonekaasujen päästöistä on vähintään 55 prosenttia /22/. Yhdysvallat ilmoitti 2017 eroavansa Pariisin sopimuksesta.

4 Yhteenveto

Teollistumisen aikakausi aloitti uuden vaiheen ilmansaasteiden saralla, ja kasvava ihmiskunta tuottaa vuosi vuodelta yhä enemmän ilmansaasteita. Toistaiseksi puhdas ilma ei vielä ole ylellisyystuote, mutta miten tulevaisuudessa? Likaista vettä on helpompi välttää

kuin saastunutta ilmaa. Kun suurkaupunkien ilmasto käy sietämättömäksi, vain varakkailta on varaa muuttaa maaseudulle tai puhtaamman ilman maihin. Tämä lisää osaltaan ihmisten eriarvoisuutta ja saattaa pahimmillaan aiheuttaa jopa sotia tai kansanmurhia.

Nykyaikainen tiedonkulku ja informaatioteknologia lisäävät ihmisten tietoisuutta, ja todennäköisesti jossain vaiheessa myös ilman puhtaus ylittää huomiokynnyksen ympäri maailmaa. Jo nyt kansainväliset ilmastopöytäkirjat ovat saaneet osakseen paljon mielenkiintoa ja vaikuttaa osaltaan ihmisten mielipiteisiin ja sitä kautta tapakäyttäytymiseen saastuttamisen osalta. Ilmastonmuutoksen merkkejä on jo runsaasti havaittavissa ympäri maailmaa ja ne tulevat lisääntymään radikaalisti, jolleme ehdi puuttua asiaan ajoissa.

Polttomoottorien poistuminen liikenteestä on omiaan parantamaan ilmanlaatua kaupungeissa, mutta sähkön- ja lämmöntuotannon muuttaminen saasteettomaksi on myös tärkeää kokonaissaastemäärien laskun kannalta. Keski-Euroopan ja Pohjois-Amerikan liikenteen sähköistyminen on hyvällä alulla, mutta köyhemmissä ja väkirikkaammissa maissa tilanne on ajoittain täysin katastrofaalinen. Esimerkiksi Kiinassa elokuussa 2010 tapahtunut liikennesuuhka oli 100 kilometrin pituinen ja kesti kaksi viikkoa. Useat autot etenivät ruuhkassa noin kilometrin päivässä /24/.

Globaali yhteistyö on välttämätöntä, jotta ilmakehän saastuminen saadaan pysäytettyä. Puhdas ilma on jokaisen asia.

5 Lähdeluettelo

- 1 Otto Hänninen, Antti Korhonen, Heli Lehtomäki, Arja Asikainen, Isabell Rumrich, Ilmansaasteiden terveysvaikutukset, Ympäristöministeriö 2016
- 2 Ympäristöministeriön julkaisuja 2019:7, Kansallinen ilmansuojeluohjelma 2030, Ympäristöministeriö, Helsinki 2019
- 3 Harrison, R. M. (2014). Pollution - Causes, Effects and Control (5th Edition). Royal Society of Chemistry. [Viitattu 15.9.2019] Noudettu verkkosivustosta:
<https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPCECE015/pollution-causes-effects/pollution-causes-effects>
- 4 Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. & Kurki-Suoni, I. 2002. Poltto ja

- palaminen. 2. painos. Jyväskylä: Teknillistieteelliset akatemioiden julkaisut. 750. ISBN 951-666-604-3.
- 5 Srivastava, R. K. & Jozewicz, W. 2001. Flue Gas Desulfurization: The State of the Art. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 51:12, 1676-1688. ISSN 1047-3289.
 - 6 World Health Organisation, 2015a. Ambient air quality and health. Media center. [verkkosivusto]. [Viitattu 22.9.2019] <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/>
 - 7 World Health Organisation, Air quality guidelines – global update 2005 Retrieved from <https://www.who.int/airpollution/publications/aqg2005/en/>
 - 8 Manahan, Stanley E., Environmental chemistry –8th edition, CRC Press LLC 2005
 - 9 Ahokas Jukka, Elonen Esa, Pienmoottoreiden päästöt, VAKOLAn tutkimusraportti 77, Maatalouden tutkimuskeskus 1997
 - 10 Stefan Reis, Clare Howard, Mark A. Sutton (ed), Costs of ammonia abatement and climate, Springer Dordrecht Heidelberg New York London 2015
 - 11 Latvala Markus, Biokaasun tuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä, Suomen ympäristökeskus 2009
 - 12 Petersson Anneli. Biogas cleaning. 2013 Kustannus: Arthur Wellinger, Jerry Murphy ja David Baxter. The biogas handbook Woodhead Publishing ISBN 978-0-85709-741-5
 - 13 Soni V., Singh P., Shree V., Goel V. (2018) Effects of VOCs on Human Health. In: Sharma N., Agarwal A., Eastwood P., Gupta T., Singh A. (eds) Air Pollution and Control. Energy, Environment, and Sustainability. Springer, Singapore
 - 14 Niinikoski, Olli-Matti, Suomen kasvihuonekaasupäästöt Kioton pöytäkirjan ensimmäisen sopimuskauden lopussa – kokonaistilanne ja vähentämistoimenpiteet, Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2014
 - 15 Ewa Jaszczak, Żaneta Polkowska, Sylwia Narkowicz, Jacek Namieśnik, Cyanides in the environment—analysis—problems and challenges, Gdansk University of Technology 2017
 - 16 Lakanen, Laura, Luonnon kasvihuonekaasulähteiden ja -nielujen laskenta maakunnallisella tasolla, Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2011
 - 17 Valtioneuvoston kanslia, Epälineaariset ja äärimmäiset ilmaston muutokset, Selvitys Vanhasen II hallituksen tulevaisuusselontekoa varten, Valtioneuvoston kanslian julkaisuja 14/2008
 - 18 Hausfather, Z., 2008. Common Climate Misconceptions. The Water Vapor Feedback. The Yale Forum on Climate Change & The Media [verkkosivusto]. [Viitattu 15.9.2019]. Saatavissa: <http://www.yaleclimatemediaforum.org/2008/02/common-climate-misconceptions-the-water-vapor-feedback-2/>

- 19 Muntean, M., Guizzardi, D., Schaaf, E., Crippa, M., Solazzo, E., Olivier, J.G.J., Vignati, E., Fossil CO2 emissions of all world countries: 2018 report, European Union 2018
- 20 Sebastian Teir, Toni Pikkarainen, Lauri Kujanpää, Eemeli Tsupari, Janne Kärki, Antti Arasto, Soile Aatos, Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CSS) Teknologia katsaus, VTT 2011
- 21 Ilmasto-opas 2019. Metaani. [vekkosivusto]. [Viitattu 13.9.2019]. <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/ilmio/-/artikkeli/dec264e2-6350-418c-a1bc-3ef7c80676aa/metaani.html>
- 22 Huikari, Jukka, Pysäköintihallien pakokaasupäästöjen mittaaminen ja ilmanvaihdon ohjaus, Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2014
- 23 Ympäristöministeriö, Pariisin ilmastopimus, [vekkosivusto]. [Viitattu 15.9.2019]. https://www.ym.fi/pariisi2015_julkaistu_29.11.2018
- 24 Chang, Anita (August 24, 2010). "China traffic jam stretching 100 kilometres could last for weeks". The Globe and Mail. <https://web.archive.org/web/20100826082536/http://www.theglobeandmail.com/news/world/asia-pacific/china-traffic-jam-stretching-100-kilometres-could-last-for-weeks/article1683094/> Retrieved August 24, 2010.