

**Hiilidioksidin tuotanto kasvihuoneessa kalkin ja typpihapon
neutralointireaktiolla**



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Lepaa, Puutarhatalouden koulutusohjelma

Kevät, 2018

Linda Östergård

Puutarhatalouden koulutusohjelma
Lepaa

Tekijä	Linda Östergård	Vuosi 2018
Työn nimi	Hiilidioksidin tuotanto kasvihuoneessa kalkin ja typpihapon neutralointireaktiolla	
Työn ohjaaja	Teo Kannainen	

TIIVISTELMÄ

Tämän työn tavoitteena on selvittää voiko kasvihuoneen hiilidioksidilannoituksen tehdä reaktiolla, jossa kalkki neutraloidaan typpihapolla ja jonka lopputuotteena syntyy hiilidioksidia. Työn aihe on saatu Hämeen Ammattikorkeakoulu Lepaan yksiköstä.

Menetelmää kokeiltiin Lepaan kasvihuoneen koehuoneessa. Koehuoneessa kasvatettiin kurkkua ja huoneen hiilidioksidilannoitus saatiin kalkin ja typpihapon neutralointireaktiosta. Kokeen avulla selvitettiin, miten menetelmä toimii ja millaisilla typpihapon ja kalkin määrillä päästään tavoiteltuun 800 ppm hiilidioksiditasoon. Kokeessa käytettiin väkevyydeltään 60 % typpihappoa.

Menetelmää tutkittiin seitsemällä kokeella. Kokeiden tulosten perusteella hiilidioksidilannoituksen pystyy tekemään kalkin ja typpihapon reaktiolla. Kokeen luonteen takia kokeen tekemiseen käytettiin paljon manuaalista työtä ja manuaalisia säätöjä, mutta menetelmä on mahdollista automatisoida.

Lopputuloksena menetelmä toimi parhaiten silloin, kun huoneen hiilidioksiditaso nostetaan nopeasti annostelemalla typpihappoa 12 - 24 ml/m³/h kunnes päästään tavoiteltuun hiilidioksiditasoon. Hiilidioksiditason nopean nostamisen jälkeen typpihapon annostelu alennetaan 2,4 ml/m³/h tuuletusluukkujen ollessa kiinni. Ilmanvaihdon ollessa vähäistä typpihapon annostelu on 4,8 ml/m³/h. Annostelemalla typpihappoa 2,4 – 4,8 ml/m³/h huoneen hiilidioksiditaso pysyy yli tavoitellun 800 ppm.

Avainsanat hiilidioksidilannoitus, kasvihuonetuotanto, typpihappo, kalkki

Sivut 27 sivua, joista liitteitä 2 sivua

Degree programme in Horticulture
Lepaa

Author	Linda Östergård	Year 2018
Subject	Carbon Dioxide Production in Greenhouse by Neutralizing Lime with Nitric acid	
Supervisors	Teo Kanniainen	

ABSTRACT

The aim of this thesis was to find out if carbon dioxide fertilization can be done by a reaction where lime is neutralized by nitric acid and where carbon dioxide is produced. The topic of this thesis came from Häme University of Applied Sciences from Lepaa unit.

The method was tested in an experiment room in the greenhouse in Lepaa. In the experiment room cucumber was grown and the room's carbon dioxide fertilization was done with the neutralizing reaction of lime and nitric acid. The aim of the test was to find out if the method works and what kind of quantities of lime and nitric acid were needed to reach the desired 800 ppm carbon dioxide level. The concentration of the nitric acid used in the experiment was 60 %.

The method was tested with seven tests. According to the results, carbon dioxide fertilization can be done with the reaction of lime and nitric acid. Plenty of manual labour and adjustments were used during the tests because of the nature of the tests. However, the method is possible to be automatized.

As a conclusion, this method works best when the carbon dioxide level in the room is raised quickly to the desired carbon dioxide level by dosing nitric acid 12 - 24 ml/m³/h. After the desired carbon dioxide level is reached, the dosage of nitric acid is reduced to 2,4 ml/m³/h if the ventilation hatches are closed. If there is minor ventilation, the dose of nitric acid should be 4,8 ml/m³/h. The dosage of 2,4 – 4,8 ml/m³/h nitric acid maintains carbon dioxide level over the desired 800 ppm.

Keywords carbon dioxide fertilization, greenhouse production, nitric acid, lime

Pages 27 pages including appendices 2 pages

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	TEORIATAUSTA	2
2.1	Hiilidioksidin tuotanto kasvihuoneessa.....	2
2.2	Hiilidioksidin lähteet.....	3
2.2.1	Puhdas hiilidioksidi	3
2.2.2	Polttamalla tuotettu hiilidioksidi.....	3
2.2.3	Eloperäisestä aineesta peräisin oleva hiilidioksidi	4
2.3	Typpihapon ja kalkin neutralointireaktio	4
3	KOKEELLINEN OSA	4
3.1	Kokeen valmistelu	4
3.1.1	Laboratoriokokeet	5
3.1.2	Muut kokeen valmistelut.....	6
3.2	Kokeen prosessikuvaus ja hapotusjaksot.....	7
4	TULOKSET	12
4.1	Hapotusjakso 1	12
4.2	Hapotusjakso 2	13
4.3	Hapotusjakso 3	14
4.4	Hapotusjakso 4	15
4.5	Hapotusjakso 5	16
4.6	Hapotusjakso 6	17
4.7	Hapotusjakso 7	18
4.8	Kalkin määrä hapotusjaksojen jälkeen.....	21
5	JOHTOPÄÄTÖKSET	21
	LÄHTEET	27

Liitteet

Liite 1 Laskut

1 JOHDANTO

Kasvit käyttävät hiilidioksidia yhteyttämiseen ja siksi hiilidioksidi on tärkeä osa kasvien kasvua. Kasvihuoneviljelyssä kasveille annetaan yleensä hiilidioksidilannoitusta, sillä optimaalinen hiilidioksiditaso tehostaa kasvien kasvua varsinkin pimeään vuodenaikaan. Kasvihuonetuotannon kannattavuutta pyritään jatkuvasti nostamaan ja sen kasvattaminen on monen tekijän summa. Hiilidioksidilannoitus on yksi merkittävä osa ympärivuotisen kasvihuonetuotannon kannattavuuden parantamista.

On olemassa eri tapoja tuottaa lisähiilidioksidia kasvihuoneeseen. Tavallisesti hiilidioksidilannoitus tehdään puhtaalla hiilidioksidilla tai polttamalla maakaasua. Myös orgaanisessa kasvualustassa viljeltäessä hiilidioksidia vapautuu suoraan kasvualustasta.

Tämä opinnäytetyö keskittyy menetelmään, jollaista ei ole perinteisesti käytetty hiilidioksidin tuotantoon. Menetelmä perustuu kalkin ja typpihapon reaktioon, jossa typpihappo neutraloi kalkkia. Tiedetään, että kalkin ja typpihapon neutralointireaktio tuottaa hiilidioksidia. On mahdollista, että kasvihuoneen hiilidioksidilannoituksen voi tehdä tämän reaktion avulla. Tämän opinnäytetyön tarkoitus on selvittää, miten hiilidioksidilannoitus onnistuu normaaleissa kasvatolosuhteissa typpihapon ja kalkin neutralointireaktiolla.

Menetelmää kokeiltiin käytännön kokeella. Kokeella pyrittiin selvittämään millaisilla määrillä ja missä ajassa saadaan kasvihuoneen hiilidioksiditaso kasville optimaaliselle tasolle. Koetta varten perustettiin kurkkuviljelmä kasvihuoneeseen. Kurkku (*Cucumis sativus*) kasvatettiin ammattiviljelyn mukaisesti. Viljelmä perustettiin Lepaan kasvihuoneen koeosastoon ja osastolle perustettiin tila, jossa kalkin ja typpihapon reaktio tapahtuu.

Tuloksia seurataan huoneessa olevien antureiden avulla. Pääasiassa tässä työssä keskitytään huoneen hiilidioksidilukemiin. Kokeen jälkeen kerätyn datan perusteella analysoidaan hiilidioksidilannoituksen onnistumista. Ilmanvaihtoluukkujen asennot ja muut tekijät otetaan huomioon tarvittaessa.

Tämä opinnäytetyö keskittyy hiilidioksidin tuotantoon ja raaka-aineiden määriin, eikä ota kantaa menetelmän kustannuksiin tai kannattavuuteen. Tämän opinnäytetyön aihe on saatu Hämeen Ammattikorkeakoulusta Lepaan yksiköstä. Yhteistyökumppanina toimi Nordkalk Oy lahjoittamalla kokeeseen tarvittavan kalkin.

Tässä opinnäytetyössä puhutaan hapotuksesta, jolla tarkoitetaan typpihapon sekoitusta kalkkiin, jolloin syntyy hiilidioksidia vapauttava reaktio. Hiilidioksiditaso huoneessa kuvataan yksiköllä ppm.

2 TEORIATAUSTA

Hiilidioksidi on näkymätön ja hajuton kaasu. Sen pitoisuus ilmoitetaan englanninkielisellä termillä parts per million eli ppm. (Koivunen 2003, 57) Ulkoilmassa on tällä hetkellä hiilidioksidia noin 400 ppm (Earth System Research Laboratory). Ulkoilman hiilidioksidipitoisuus kasvaa hieman joka vuosi (Koivunen 2003, 57).

2.1 Hiilidioksidin tuotanto kasvihuoneessa

Kasvit tarvitsevat hiilidioksidia fotosynteesiin. Fotosynteesin raaka-aineina toimivat vesi, valo ja hiilidioksidi. Kasvit käyttävät valoenergiaa hyödykseen, ja yhteyttävät hiilidioksidin ja veden sokeriksi, kun niiden ilmaraot ovat auki. Hiilidioksidilannoitus on siis turhaa silloin, kun kasvi ei yhteytä eli esimerkiksi viileällä ilmalla tai pimeään aikaan. (Koivunen 2003, 57)

Kasvihuoneviljelyssä kasveille annetaan hiilidioksidilannoitusta. Tämä mahdollistaa kasvien tehokkaamman yhteyttämisen. Valoisana päivänä huoneen hiilidioksidipitoisuus laskee jopa alle 200 ppm jos hiilidioksidilannoituksella ei korvata kasvien yhteyttämiseen kuluva hiilidioksidia. Alhainen hiilidioksiditaso rajoittaa kasvien kasvua. (Koivunen 2003, 57 – 58) Hiilidioksiditason laskettua alle 100 ppm, kasvien kasvu pysähtyy (Heimonen & Hänninen 1999, 9).

Talvella viljeltäessä kasvihuoneita tuuletetaan vähän. Tämä tarkoittaa sitä, että huoneen hiilidioksidipitoisuus laskee helposti liian alhaiseksi. Tuuletuksen vähyyden takia huoneen hiilidioksiditaso ei nouse, koska huoneeseen ei pääse ulkoilmasta hiilidioksidia. Alhainen hiilidioksiditaso hidastaa kasvien kasvua ja myöhentää satoa sekä alentaa kuiva-ainepainoa. (Koivunen 2003, 58).

Kasvihuoneen hiilidioksidipitoisuus pyritään pitämään 600 – 1000 ppm välillä. Yli 1000 ppm hiilidioksidipitoisuus ei ole suositeltu, koska liian suuren pitoisuuden myös rajoittavat kasvien kasvua. Ilman kierrättäminen tehostaa hiilidioksidin jakaantumista huoneeseen ja estää hiilidioksiditason laskua. (Koivunen 2003, 58-59)

Kasvusto käyttää hiilidioksidia noin 0 - 2 kg tuhatta neliometriä kohden tunnissa. Hiilidioksidin annostelu tapahtuu yleensä hiilidioksidianturin perusteella. Ilmanvaihdon takia hiilidioksidia voi joutua annostelemaan enemmän kuin kasvusto kykenee käyttämään hyödykseen, koska osa menee hävikkiin ilmanvaihdon takia. (Koivunen 2003, 58-59)

Kasvien hiilidioksidin tarve määräytyy muiden kasvutekijöiden mukaan. Pääasiassa valon määrä, ilman lämpötila ja veden saanti määrittelevät sen,

miten tehokkaasti kasvi käyttää hiilidioksidin hyödykseen. Myös eri kasvit tarvitsevat eri määrän hiilidioksidia. Vaihtelua voi olla niin kasvilajien, lajikkeiden ja kasvun vaiheen välillä. Nopeasti kasvaville kasveille, kuten vihannekset, emotaimet ja leikkokukat, hiilidioksidilannoitus on erityisen tärkeää. (Koivunen 2003, 58-59)

2.2 Hiilidioksidin lähteet

Kasvihuonetuotannossa on useita erilaisia tapoja tuottaa hiilidioksidia. Hiilidioksidia voidaan lisätä puhtaana hiilidioksidina, polttamalla maakaasua, propaania, nestekaasua tai lähes rikitöntä polttoöljyä. Hiilidioksidia syntyy myös eloperäisistä aineista kuten turpeesta tai oljesta. (Koivunen 2003, 59)

Pimeään aikaan kasvit eivät yhteytä eivätkä kuluta hiilidioksidia. Sen sijaan kasvit vapauttavat ilmaan hiilidioksidia yöllä. Tämä hiilidioksidi kannattaa käyttää hyödyksi aamulla siten, että huoneen tuuletusta ei aloiteta ennen kuin huoneen hiilidioksidipitoisuus on laskenut normaalitasolle. (Koivunen 2003, 59.)

2.2.1 Puhdas hiilidioksidi

Puhdas hiilidioksidi on turvallinen tapa lisätä hiilidioksidia kasvihuoneeseen. Puhdas hiilidioksidi on lähes 100-prosenttisesti hiilidioksidia. Hiilidioksidi ohjataan kasvihuoneen ulkopuolella sijaitsevasta painesäiliöstä kasvihuoneeseen. Puhtaan hiilidioksidin käyttö kasvihuoneessa on kallista, mutta helppoa. Hinnan vuoksi sen kulutusta on kuitenkin seurattava ja lannoitus kannattaa tehdä anturien ja automatiikan avulla. (Koivunen 2003, 73.)

2.2.2 Polttamalla tuotettu hiilidioksidi

Polttamalla tuotettu hiilidioksidi on itsetuotettua ja edullisempaa kuin puhtaan hiilidioksidinkäyttö. Hiilidioksidia saadaan aikaan polttamalla maakaasua, nestekaasua, propaania tai mahdollisimman rikitöntä polttoöljyä. Hiilidioksidi ohjataan huoneeseen tai polttolaite sijoitetaan kasvihuoneeseen. (Koivunen 2003, 73-74.)

Tällä menetelmällä on kuitenkin huonot puolensa, sillä savukaasut sisältävät epäpuhtauksia, kuten häkä, etyleeni ja typpioksidit ja muut hiilivedyt. Polttamalla tuotettu hiilidioksidi vaatii varatoimenpiteitä mahdollisten vahinkojen varalta. (Koivunen 2003, 74) Polttamalla tuotettu hiilidioksidi tuottaa lämpöä. Tämä lämpö on mahdollista käyttää hyväksi ja ohjata se lämmittämään kasvihuonetta. (Heimonen & Hänninen 1999, 9).

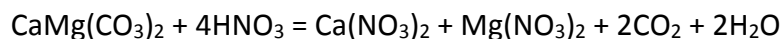
2.2.3 Eloperäisestä aineesta peräisin oleva hiilidioksidi

Oljesta ja turpeesta vapautuu hiilidioksidia pieneliötoiminnan takia. Orgaanisen aineen käyttöä hiilidioksidin lähteenä ei käytetä yhtä usein kuin puhdasta hiilidioksidia tai polttamalla tuotettua hiilidioksidia. (Koivunen 2003, 59.) Orgaanisen kasvualustan käyttö viljelmillä on vähentynyt ja kasvualustojen koko on pienentynyt. (Heimonen & Hänninen 1999, 9)

Kasvihuoneeseen voidaan tuottaa hiilidioksidia olkikompostilla. Kompostia varten rakennetaan kompostori kasvihuoneen ulkopuolelle, josta syntyvä hiilidioksidi ohjataan kasvihuoneeseen. Olki on edullista ja hyvin saatavissa oleva raaka-aine. (Heimonen & Hänninen 1999, 10-11.)

2.3 Typpihapon ja kalkin neutralointireaktio

Tämä opinnäytetyö perustuu reaktioyhtälöön, jossa typpihapolla neutraloidaan kalkkia. Reaktion seurauksena vapautuu hiilidioksidia. Reaktioyhtälö on seuraavanlainen, jos käytetään dolomiittikalkkia:



Yhtälön perusteella nähdään, että kun 252 g typpihappoa reagoi 100 g kalkin kanssa, saadaan 88 g hiilidioksidia. Lisäksi muodostuu vettä 36 g, kalsiumnitraattia ja magnesiumnitraattia 148,3 g. Yhtälössä typpihappo on 100 %.

Kalsiittia käyttäessä reaktioyhtälö on:



100 g kalkkia neutraloi 126 g 100 % typpihappoa ja tuloksena saadaan 44 g hiilidioksidia, 164 g kalsiumnitraattia ja 18 g vettä.

3 KOKEELLINEN OSA

Hiilidioksidin tuotantokoe tehtiin kasvihuoneessa normaaleissa viljelyolosuhteissa. Koepaikkana oli Lepaan kasvihuoneessa sijaitseva koeosasto 3. Viljelykasviksi valittiin kurkku sen nopean kasvun ja suuren yhteyttävän massan takia.

3.1 Kokeen valmistelu

Ennen varsinaisen kokeen aloittamista arvioitiin laskelmien avulla kuinka paljon kalkkia ja typpihappoa tarvitaan. Laskelmat tehtiin reaktioyhtälön ja koehuoneen koon perusteella. Kurkun hiilidioksidin käyttöä oli hankala

määrittää tarkasti etukäteen. Vertailuna laskettiin Lepaan tomaattihuoneen keskimääräinen hiilidioksidilannoituksen määrä syys- loka- ja marraskuun ajalta. Tulokseen lisättiin 20 %, koska kurkku on nopeakasvuisempi kuin tomaatti.

Lopullinen arvio hiilidioksidin tarpeesta on 11,4 kg vuorokaudessa 416 m³ kokoisessa huoneessa. Yhtälön perusteella laskettiin, että jos tavoitteena on saada 11,4 kg hiilidioksidia vuorokaudessa, tarvitaan 29,5 kg kalkkia ja 49.167 l 60 % typpihappoa sen saamiseksi, jos käytetään dolomiittikalkkia. Lisäksi reaktiosta syntyy 5,7 l vettä, 23,7 kg magnesiumnitraattia ja 26,3 kg kalsiumnitraattia. Kokeessa valotettu aika oli 18 tuntia. Jos oletetaan, että lisähiilidioksidia annetaan koko valotettu aika, typpihapon annostelunopeus olisi 6,5 ml/m³/h.

Kalsiittia käytettäessä kokeessa tarvittavat määrät ovat 26 kg kalkkia ja 39,8 l 60 % typpihappoa, kun tavoitteena on saada 11,4 kg hiilidioksidia päivässä. Lisäksi reaktio synnyttää kalsiumnitraattia 42,5 kg ja vettä 4,6 l. Typpihapon annostelunopeus olisi arviolta 5,3 ml/m³/h. Kalsiittia käytettäessä arvio raaka-aineiden tarpeesta on pienempi. Laskelmat ovat kuitenkin karkeita arvioita siitä, miten paljon kokeeseen tarvitaan raaka-aineita. On mahdotonta sanoa pelkkien laskelmien avulla, toteutuuko määrät normaaleissa viljelyolosuhteissa.

Ennen varsinaista koetta oli tarkoitus käyttää dolomiittikalkkia, joten arviot on tehty sen perusteella. Itse kokeessa käytettiin kuitenkin kalsiittia, koska sitä Nordkalk Oy toimitti koetta varten. Jotta reaktiosta saadaan päivässä 11,4 kg hiilidioksidia 416 m³ kokoiseen huoneeseen, kalkkia joudutaan käyttämään 29.5 kg ja 49,167 l 60 % typpihappoa. Jos hiilidioksidilannoitus kestää tasaisesti koko valotetun ajan, eli 18 tuntia, typpihapon annostelunopeus olisi 6,5 millilitraa tunnissa. Kalkkia tunnissa kuluisi 1.64 kg.

3.1.1 Laboratoriokokeet

Hiilidioksidin tuotanto kalkilla ja typpihapolla testattiin ennen koetta laboratoriossa. Testillä varmistettiin laskelmat ja menetelmän toimivuus. Samalla kokeiltiin kannattaako kalkki olla kuivaa vai vedessä silloin, kun typpihappo sekoitetaan siihen. Laskelmien mukaan 29.5 kg kalkkia tarvitsee 49.167 litraa typpihappoa, että reaktio on täydellinen. Kokeella arvioitiin myös sitä miten nopeaa tahtia happoa voi sekoittaa kalkkiin ja miten kauan reaktio kestää. Kokeessa kalkin määrä oli 50 g ja typpihapon arvioitu määrä oli 115 ml. Typpihappo oli väkevyydeltään 60 %.

Kokeita tehtiin kaksi samanlaista, toinen kuivalla kalkilla ja toinen vedessä olevalla kalkilla. Kalkin kastelu tehtiin siten, että kalkki peittyi veteen ja sekoittamisen jälkeen se oli täysin märkää. Kokeesta selvisi, että reaktio on nopeampi ja helpompi, kun kalkki on vedessä. Typpihappo sekoittui

märkään kalkkiin helpommin eikä reaktio ollut yhtä intensiivinen kuin kuivan kalkin kanssa.

Kokeessa huomattiin, että jos happo ei sekoitu tarpeeksi kalkkiin, reaktio vaimenee ja loppuu, vaikka astiassa on reagoimatonta typpihappoa. Kuivan kalkin kanssa oli myös ongelma, jossa reaktiokohta jähmettyi nopeasti ja reaktio loppui ennenaikaisesti. Typpihapon sekoittaminen kalkkiin oli työläämpää kuin vedessä olevaan kalkkiin.

Vedellä ei ollut suurta vaikutusta reaktion tuottamaan lämmön nousuun. Korkeimmillaan lämpötila nousi 50 asteeseen kummassakin kokeessa. Silmä määräisten havaintojen perusteella hiilidioksidin tuotanto oli samankaltainen sekä kuivan, että märän kalkin kanssa.

Kokeen alkuvaiheessa typpihapon ja kalkin reaktio oli voimakas ja lyhyt. Typpihappoa annosteltiin aluksi 30 ml kerralla, mutta se oli liian suuri määrä hapotuksen alkuvaiheessa. Suuri annostelu aiheutti voimakkaan reaktion. Mitä enemmän typpihappoa oli kalkkiastiassa, sitä hitaammin reaktio alkoi ja sitä hitaammin se myös loppui. Kokeen perusteella typpihapon annostelu tulee aloittaa pienemmällä määrällä ja kasvattaa määrää silloin kun astiassa kalkin määrä vähenee ja astiassa alkaa olemaan enemmän nestettä.

Kokeen loppuvaiheessa ongelmaksi muodostui aineiden kerrostuminen. Tämän takia massan sekoitus on tärkeää parhaan hyödyn saamiseksi. Aineiden ei kannata antaa kerrostua liikaa, koska reaktio voi olla voimakas, jos sekoitus tapahtuu harvoin. Hapotusta kokeiltiin kuivaan kalkkiin ilman sekoitusta. Massa jähmettyi nopeasti ja hiilidioksidintuotanto ei ollut tehokasta. Massaa on järkevää sekoittaa koko reaktion ajan, jolloin hiilidioksidin tuotanto pysyy mahdollisimman tasaisena.

Kokeessa ei mitattu hiilidioksidin vapautumisen pitoisuuksia, mutta silmä määräisten havaintojen perusteella typpihappoa joutui käyttämään lähes kaksinkertaisesti enemmän, että kalkki saatiin kokonaan käytettyä reaktioon ja hiilidioksidin vapautumien oli tehokasta. Kokeen loputtua typpihappoa oli kulunut 160 ml. On mahdollista, että laskettu 115 ml happoa riittää reagoimaan lopun kalkin kanssa, mutta hiilidioksidin vapautuminen tässä tapauksessa ei ole tehokasta ja reaktio on hyvin hidasta. Reaktio ei ole kuitenkaan puhdas, joten typpihappoa kuluu enemmän kuin 115 ml.

3.1.2 Muut kokeen valmistelut

Koe suoritettiin 416 m³ kokoisessa koehuoneessa Lepaan kasvihuoneella syksyllä 2016. Koe aloitettiin syyskuussa ja lopetettiin lokakuussa. Huoneessa oli suurpainainen natriumlaput, joiden asennusteho oli 100 w/m². Ennen koetta päädyttiin käyttämään kalsiittista kalkkia dolomiittikalkin sijaan, koska Nordkalk Oy toimitti kokeeseen kalsiittia. Laboratoriokokeet tehtiin sen perusteella, että kokeessa olisi käytetty dolomiittikalkkia.

Laboratoriokokeet osoittivat kuitenkin typpihapon määrän tarpeen olevan epätarkka, joten laskelmia pidettiin vain suuntaa antavana. Laskelmien perusteella arvioitiin, että tavoiteltuun hiilidioksiditasoon tarvitaan päivässä kalkkia noin 29,5 kg ja typpihappoa 49,167 litraa.

Kurkun taimet kasvatettiin itse. Lajikkeeksi valittiin Rapides. Koska lajikevalinnalla ei ollut suurta merkitystä kokeeseen, valinta tehtiin sen perusteella, mikä soveltuu syksyllä tapahtuvaan valoviljelyyn. Taimikasvatus tehtiin turpeeseen ja kasvusäkit olivat perliittiä. Kasvualustalla ei ollut merkitystä kokeeseen ja ne valittiin käytännöllisistä syistä.

Koetta varten tehtiin laitehankintoja. Koehuoneen pienen koon vuoksi happosäiliöt päädyttiin sijoittamaan kasvihuoneen ulkopuolelle. Turvallisuussyistä hapoille hankittiin lukittava varastokontti. Kontin sisälle laitettiin turva-allas happosäiliöiden alle happovuotojen varalta. Happo ohjattiin kontista kasvihuoneeseen letkun kautta. Hapon annosteluun hankittiin annostelupumppu. Kalkin ja hapon sekoittamiseen hankittiin ilmapumppu. Hiilidioksidin levitykseen hankittiin yksinkertainen pöytätuuletin. Viimeiseen kokeeseen hankittiin iso astia hapolle, jolloin letkua ei tarvinnut siirtää happoastiasta toiseen kesken kokeen.

Nordkalk Oy toimi kokeessa yhteistyökumppanina lahjoittamalla kokeeseen tarvittavan kalkin. Kalkkina käytettiin kalsiittikalkkia. Väkevyydeltään 60 % typpihappo hankittiin 30 kg astioissa. Kokeessa typpihappo käsiteltiin millilitroina.

3.2 Kokeen prosessikuvaus ja hapotusjaksot

Kokeiden aikana kasvuolosuhteet pyrittiin pitämään mahdollisimman samakaltaisina. Valot pidettiin päällä 18 tuntia päivässä, aikavälillä 06.00 - 23.00, ja ylikastelun johtokyky pyrittiin pitämään kolmessa. Päivälämpötila oli 24 astetta ja yölämpötila 20 astetta. Säteilyraja nostettiin niin korkeaksi, että käytännössä valot paloivat 18 tuntia joka päivä.

Hiilidioksidin määrää huoneessa mitattiin pääasiassa kasvihuoneautomaatiikkaohjausjärjestelmä Privan anturilla. Kasvihuoneautomaatiikan anturi antaa mittaustulokset viiden minuutin välein. Huoneessa oli myös toinen laite nimeltään mittaattori vertailuna, mutta sen hiilidioksidiarvojen mittaustulokset olivat vain suuntaa antavia anturin vian vuoksi. Kasvihuoneautomaatiikan anturi sijaitsi keskellä koehuonetta. Mittaattori ripustettiin samaan kohtaan kasvihuoneautomaatiikan anturin kanssa, joten tulokset olivat mahdollisimman vertailukelpoisia.

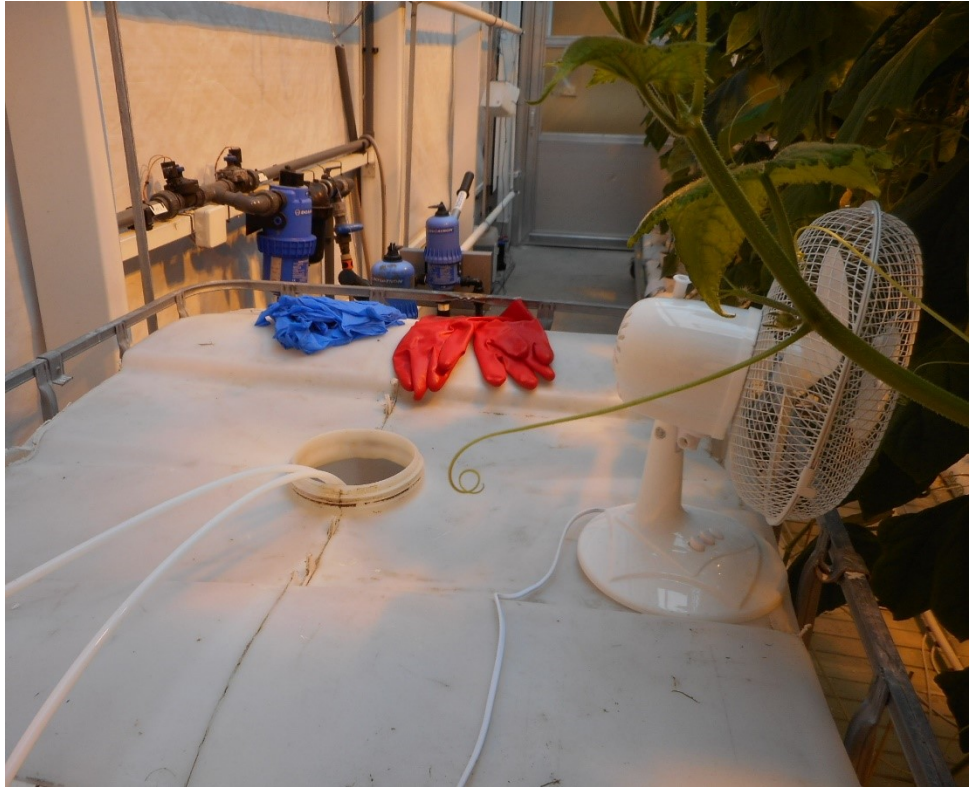
Mittaattori on kehitteillä oleva puhelinsovellus, joka kykenee lukemaan erilaisten antureiden mittaamaa dataa, tekemään niistä lokia ja siirtämään datan tiedostona dropbox.com sivustolle. Kokeessa käytettiin opiskelijaryhmän rakentamaa laitetta, jossa oli hiilidioksidianturi, kosteusanturi ja

lämpötila-anturi. Mittaattorin avulla hiilidioksiditasoa pystyttiin seuraamaan reaaliajassa puhelimesta kokeiden aikana. Vaikka sen mittaustulos ei ollut oikea, sen avulla nähtiin kuitenkin mihin suuntaan hiilidioksiditaso kehittyi.

Kalkki laitettiin isoon IBC-muovikonttiin, josta oli leikattu kansi pois. Konttiin laitettiin noin 500 kg kalkkia. Kalkki kasteltiin vedellä ja sekoitettiin mahdollisimman tasaisen märäksi. Kontti sijoitettiin koehuoneen nurkkaan sen ulkoseinän lähelle, jonka takana sijaitti typpihappokontti. Irtonainen kansi pidettiin kontin päällä, koska sen avulla ilmapumpun ja typpihapon annostelupumppu saatiin lähes keskelle konttia. Vapautuvan hiilidioksidin leviämistä pyrittiin tehostamaan tavallisella pöytätuulettimella kontin päällä.



Kuva 1. Kalkki IBC-kontissa koehuoneessa



Kuva 2. IBC-kontin kansi ja pumppujen letkut.



Kuva 3. Ilmapumppu ja annostelupumppu.

Kontin viereen pantiin pöytä, jonka päälle sijoitettiin annostelupumppu ja ilmapumppu. Kasvihuoneen ulkoseinään tehtiin pieni reikä, jonka kautta annostelupumpun letku saatiin ulkopuolella olevaan varastokonttiin, jossa typpihappokanisterit sijaitsivat.



Kuva 4. Varastokontti koehuoneen ulkopuolella.



Kuva 5. Typpihappokanisterit turva-altaan päällä. (Kuva: Teo Kannainen)

4 TULOKSET

Hiilidioksidilannoitusta tutkittiin seitsemän hapotusjakson ajan. Kokeiden olosuhteet pidettiin mahdollisimman samankaltaisina tuuletusluukkujen asentoa luukuunottamatta. Tavoitteeksi oli päätetty 800 ppm, koska se on sopiva hiilidioksiditaso kurkulle. Kokeessa käytettiin kalsiittista kalkkia. Ennakkolaskelmien mukaan päivässä kuluu 49,167 litraa 60 % typpihappoa ja 29,5 kg kalkkia. Jos hiilidioksidilannoitus tehdään koko valotetun 18 tunnin ajan, määrät ovat 6,5 ml/m³/h 60 % typpihappoa ja 1.64 kg/h kalkkia.

Ensimmäiset kolme koetta tuuletusluukkujen aukioloa ohjattiin kasvihuoneautomaatiikalla. Neljännessä kokeessa luukkujen avautumista rajoitettiin. Luukut pidettiin kiinni kokeissa viisi, kuusi ja seitsemän. Kun huoneeseen ei lisätty hiilidioksidia, huoneen hiilidioksiditasot vaihtelivat 300 - 400 ppm välillä valotuksen aikaan ja pimeän aikaan 400 – 500 ppm välillä.

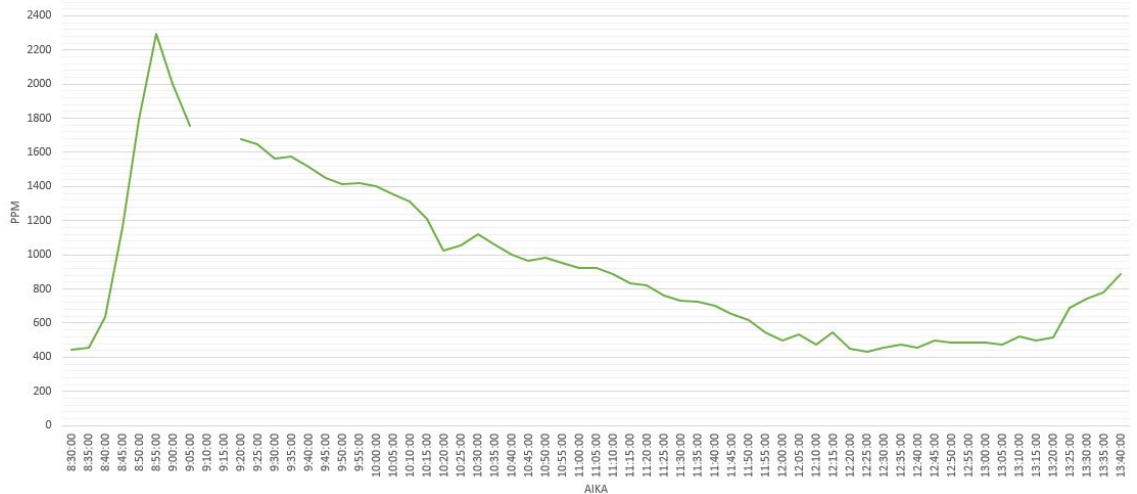
4.1 Hapotusjakso 1

Ensimmäinen hiilidioksidilannoitus suoritettiin 20.9. Tuuletusluukkujen annettiin olla vapaasti auki. Päivä oli pilvinen ja viileä, joten luukut olivat kiinni kokeen ajan. Ensimmäisen kokeen tarkoituksena oli selvittää millä typpihapon määrällä päästään tavoiteltuun 800 ppm hiilidioksiditasoon.

Koe aloitettiin sekoittamalla kalkkiin 60 % typpihappoa 24 ml/m³/h vauhdilla. Hapotus aloitettiin klo 08.30. Huoneen hiilidioksidipitoisuus nousi nopeasti yli hälytysrajan, mikä oli tuolloin 2000 ppm. Korkeimmillaan hiilidioksiditaso kävi 2292 ppm. Ensimmäinen hapotus lopetettiin klo 08.52. Hapotusta tehtiin 22 minuuttia. Sinä aikana hiilidioksidipitoisuus huoneessa nousi 1846 ppm. Hapotuksen lopettamisen jälkeen kesti noin neljä tuntia, kunnes huoneen hiilidioksiditaso oli laskenut normaaliksi.

Hapotus aloitettiin uudestaan klo 12.24. Happoa annosteltiin 12 ml/m³/h vauhdilla ensimmäiset kahdeksan minuuttia, jotta hiilidioksiditaso lähtisi nopeasti nousemaan. Hiilidioksiditaso nousi tänä aikana 40 ppm. Klo 12.32 hapotus annostelu alennettiin 4,8 ml/m³/h vauhdille. Jyrkkää nousua ei tapahtunut vaan hiilidioksiditaso pysyi alle 600 ppm kunnes klo 13.20 hiilidioksiditaso lähti nousuun.

Nousu oli loivempaa kuin ensimmäisellä hapotuskerralla. Hiilidioksiditaso lähti jyrkkään nousuun klo 13.20, jolloin typpihapon annostelu oli jo laskettu 4,8 ml/m³/h määrään. Klo 14.15 hiilidioksiditaso oli korkeimmillaan 951 ppm. Koe lopetettiin klo 13.39, joten ei ole tiedossa mihin ppm lukemaan 4,8 ml/m³/h olisi riittänyt. Tavoiteltuun 800 ppm tasoon päästiin klo 13.35. Koe lopetettiin klo 13.39. Toinen hapotus kesti tunti 10 minuuttia.



Kuva 6. Hiilidioksidilannoitus. Hapotusjakso 1

Ensimmäinen koepäivä osoitti sen, että jos luukut ovat kiinni, hiilidioksidilannoitus onnistuu kalkin ja typpihapon reaktiolla. Huoneen hiilidioksiditaso ei kuitenkaan pysynyt tasaisena. Tason epätasaisuus voi johtua tuuletusluukkujen asennosta tai typpihapon ja kalkin heikosta sekoittumisesta. Kasvihuoneautomaatiikan datan mukaan tuuletusluukut olivat kiinni kokeen ajan. Hiilidioksidin levittyminen huoneeseen on myös epäselvää, koska huoneen anturit olivat vain keskellä huonetta.

4.2 Hapotusjakso 2

Toinen hapotusjakso suoritettiin 23.9. Tuuletusluukut saivat edelleen olla vapaasti auki. Hapon annostelu alkoi klo 07.44. 60 % typpihappoa annosteltiin alussa 24 ml/m³/h, jotta hiilidioksiditaso saatiin nopeasti nousemaan. Tämä kesti 10 minuuttia, jolloin hiilidioksiditaso laski 326:sta 308 ppm. Tässä ajassa hiilidioksiditaso ei noussut samalla tavalla kuin ensimmäisessä kokeessa. Annostelu laskettiin 4,8 ml/m³/h kello 07.54. Koe lopetettiin kello 14.17. Kokeen aikana hiilidioksiditaso oli korkeimmillaan 1371 ppm. Koe kesti 6 tuntia 33 minuuttia.



Kuva 7. Hiilidioksidilannoitus. Hapetusjakso 2

Toisesta koepäivästä ei saatu kaikkia mittaustuloksia, koska kasvihuoneautomaatiikkaa huollettiin. Edellä mainitut tulokset perustuvat puhelinsovel-lus Mittaattorin lukemiin. Kokeessa käytettiin opiskelijaryhmän rakenta-maa laitetta, jonka mittaamat arvot voi nähdä reaaliajassa puhelinsovel-luksesta. Mittaattorin hiilidioksidianturi ei ollut luotettava, koska se näytti hyvin eri lukemia kasvihuoneautomaatiikan anturiin verrattaessa. Mittaat-torin hiilidioksidi mittausta ulottuu 1371 ppm asti ja sen antama tulos on mahdollisesti virheellinen. Todellisuudessa kokeessa huoneen hiilidioksidit-ason arvioidaan menneen yli 1371 ppm. Tämän takia hapetusjakso 2 hiili-dioksidilukemat jäävät osaksi huomioitta tuloksia analysoitaessa. Hapetus-jakso 2 osoitti kuitenkin sen, että typpihapon ja kalkin reaktion alkaminen on jo hidastunut.

4.3 Hapetusjakso 3

Kolmas koe suoritettiin 26.9. Luukkujen annettiin edelleen olla automaa-tilla. Päivä oli lämmin ja aurinkoinen, joten luukut olivat suurimman osan päivästä auki. Hapon annostelu aloitettiin kello 08.00 annostelemalla 4,8 ml/m³/h. Hiilidioksiditaso nousi 448 ppm:stä 555 ppm. Annostelu alennet-tiin 2,4 ml/m³/h klo 08.35. Hiilidioksiditaso jatkoi nousua loivasti.

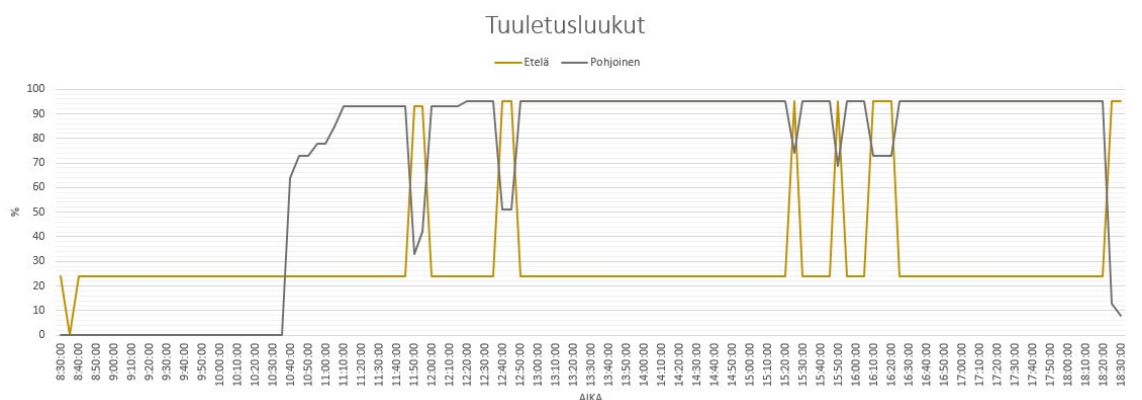
Hiilidioksiditaso klo 08.54 oli 563 ppm, joten nousua oli tapahtunut 11 ppm 19 minuutissa. Hapon annostelu nostettiin takaisin 4,8 ml/m³/h kello 08.54, koska hiilidioksidin nousu oli hidasta. Annostelun nostamisen jäl-keen hiilidioksiditaso lähti aiempaa nopeampaan nousuun. 46 minuutin jälkeen saavutettiin tavoiteltu 800 ppm. Hiilidioksiditaso pysyi lähes tavoit-tellulla tasolla aikavälillä 9.40 – 11.40, jolloin hiilidioksiditaso vaihteli 730 – 944 välillä vaihdellen jatkuvasti 800 ppm:n molemmin puolin.

26.9



Kuva 8. Hiilidioksidilannoitus. Hapotusjakso 3.

Hiilidioksiditaso aleni nopeasti klo 11.40 jälkeen. Taso pysyi alle 500 ppm kokeen loppuun asti. Pohjoisen puolen tuuletusluukut olivat auki yli 90 % lähes koko hapotusjakson ajan. Hapotusjakso 3 lopetettiin klo 18.13. Hapotusjakso 3 kesti 10 tuntia 13 minuuttia. Hapotusjakso 3 osoitti sen, että tuuletusluukkujen ollessa auki, hiilidioksidilannoitusta ei kannata antaa, koska ilmanvaihdon aiheuttama hävikki ilmakehään on suuri. Siksi seuraaviin kokeisiin tuuletusluukut säädettiin manuaalisesti joko vain raolleen tai kokonaan kiinni.



Kuva 9. Tuuletusluukkujen liikkeet hapotusjakson 3 aikana.

4.4 Hapotusjakso 4

Neljäs hapotusjakso suoritettiin 27.9. Luukut säädettiin suojan puolelle auki 20 % ja tuulen puolelle 5 %. Hapetus aloitettiin klo 9.37. Haptoa annosteltiin 4,8 ml/m³/h ja se pidettiin samana kokeen loppuun asti. Koe lopetettiin klo 15.57. Koe kesti kokonaisuudessaan 6 tuntia 20 minuuttia.

Hapotusjakson aikana hiilidioksiditason nousu oli loivaa. Tavoiteltu 800 ppm saavutettiin klo 12.15. Korkeimmillaan hiilidioksiditaso huoneessa oli 1270 ppm klo 15.55. Hiilidioksiditason nousun jälkeen hiilidioksiditaso pysytteli 1000 – 1270 välillä. Luukkujen ollessa koko ajan samassa asennossa hiilidioksiditaso pysyi tasaisempuna.

Annostelemalla typpihappoa 4,8 ml/m³/h, huoneen hiilidioksiditaso ylitti tavoitellun 800 ppm. Voidaan arvioida, että 60 % typpihapon annostus saattaa olla hyvissä olosuhteissa vähemmän kuin laskelmissa arvioitu 6,5 ml/m³/h. Hiilidioksiditason nouseminen tavoiteltuun tasoon oli kuitenkin hidasta. Hapotusjaksosta 4 voitiin päätellä, että typpihappoa tulee annostella suurempi määrä kokeen alussa, jotta tavoiteltuun tasoon päästään nopeammin. Pienempi typpihapon annostelu ylläpitää huoneen nostettua hiilidioksidipitoisuutta, jos huoneessa ei tuuleteta tai ilmanvaihto on alhainen.



Kuva 10. Hiilidioksidilannoitus. Hapotusjakso 4.

4.5 Hapotusjakso 5

Viides hapotusjakso suoritettiin 30.9. Luukut pidettiin kiinni koko hapotusjakson ajan. 60 % typpihapon annostelu aloitettiin klo 07.57 annostelemalla 4,8 ml/m³/h. Hiilidioksiditaso ei lähtenyt nousemaan, joten klo 8.30 hapon annostelu nostettiin 12 ml/m³/h.

Huoneen hiilidioksiditaso lähti nopeasti jyrkkään nousuun 25 minuutin kulluttua typpihapon annostelun nostamisesta 12 ml/m³/h. Kasvihuoneautomaatiikan anturi kykenee havaitsemaan korkeimmillaan 3000 ppm tason. Huoneen hiilidioksiditaso ehti olla 30 minuuttia yli 3000 ppm eikä tiedetä, miten korkealle hiilidioksiditaso nousi sinä aikana.

Annostelu laskettiin 4,8 ml/m³/h klo 10.57. Hiilidioksiditaso lähti nopeaan laskuun ja tasoittui vaihtelevaan 1000 – 1300 ppm välille. Hiilidioksiditaso lähti loivaan nousuun 18.40. Hiilidioksiditaso nousi 1822 ppm tasolle, jonka jälkeen se lähti loivaan laskuun. Olosuhteita tai annostelua ei muutettu klo 10,57 tehdyn annostelun laskun jälkeen. Hapetusjakso 5 lopetettiin klo 22.42. Koe kesti kokonaisuudessaan 14 tuntia 45 minuuttia.



Kuva 11. Hiilidioksidilannoitus. Hapetusjakso 5.

4.6 Hapetusjakso 6

Kuudes hapetusjakso suoritettiin 11.10. Luukut pidettiin kiinni. Hapetusjakso aloitettiin klo 07.30, jolloin hapon annostelu aloitettiin 24 ml/m³/h vauhdilla ja sitä jatkettiin 34 minuuttia. Hiilidioksiditaso lähti jyrkkään nousuun klo 8.00. Hapetus alennettiin 2,4 ml/m³/h klo 08.04. Hiilidioksiditaso nousi yli tavoitellun 800 ppm tason klo 8.25.

Hiilidioksiditaso pysyi melko tasaisena kokeen ajan. Hapetusjakson alussa tehty suurempi typpihapon annostelu sai nostettua huoneen hiilidioksiditason yli tavoitellun 800 ppm nopeasti ja 2,4 ml/m³/h riitti ylläpitämään hiilidioksiditason tavoitellussa 800 ppm tasossa. Hapetusjakso 6 aikana alun hiilidioksiditason noston jälkeen hiilidioksiditaso oli korkeimmillaan 1298 ppm ja pienemmillään 803 ppm. Huoneen hiilidioksiditaso pysyi kokeen aikana tasaisena ja sopivalla tasolla. Koe jatkui klo 22.42 saakka. Koe kesti 15 tuntia 12 minuuttia.

11.10

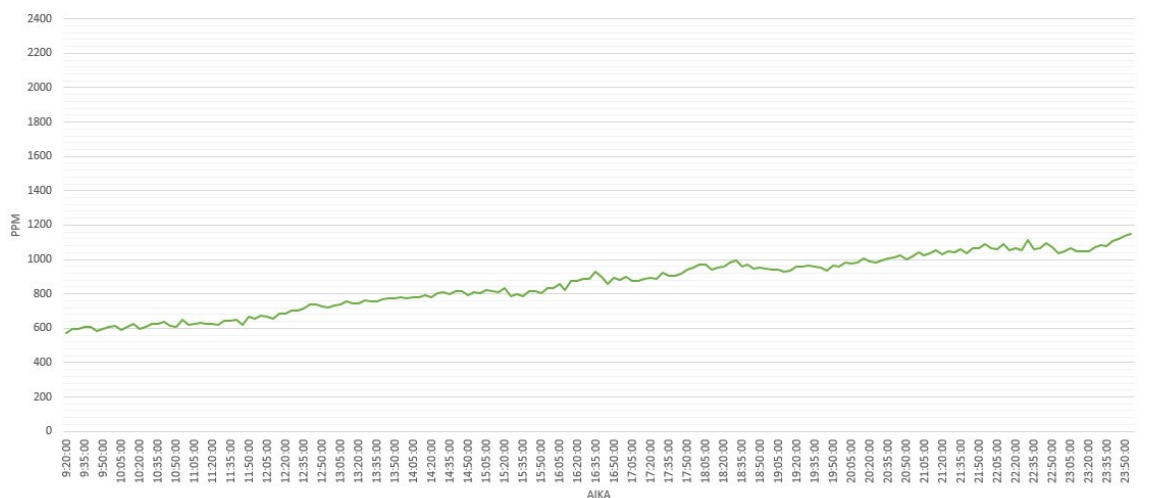


Kuva 12. Hiilidioksidilannoitus. Koe 6.

4.7 Hapetusjakso 7

Seitsemäs hapetusjakso suoritettiin siten, että hapotus aloitettiin 12.10 ja lopetettiin 15.10. Haptoa annosteltiin neljä päivää katkaisematta hapotusta välillä. Luukut pidettiin kiinni koko kokeen ajan. Hapetusjakso alkoi 12 päivä lokakuuta annostelemalla 24 ml/m³/h 60 % typpihappoa. Hiilidioksidin lähtötaso huoneessa oli 572 ppm. Annostelu aloitettiin klo 09.20. Ensimmäinen annostelu kesti 15 minuuttia ja huoneen hiilidioksiditason nousu oli vähäistä, koska nousu oli vain 36 ppm. Annostelu laskettiin 2,4 ml/m³/h klo 09.35. Tämä määrä pidettiin seuraavaan aamuun. Huoneen hiilidioksiditaso nousi loivasti. Tavoiteltu 800 ppm saavutettiin klo 14.25. Hiilidioksiditaso jatkoi loivaa nousua loppupäivän.

12.10



Kuva 13. Hiilidioksidilannoitus. Koe 7 päivä 1.

Yöllä 13.10 klo 01.30 hiilidioksiditaso saavutti korkeimman pitoisuuden, joka oli 1322 ppm. Sen jälkeen hiilidioksiditaso lähti laskuun. Alimmillaan huoneen ppm taso oli 974 ppm klo 8.10. Aamulla 13.10 klo 08.40 hiilidioksiditaso lähti jälleen nousuun ja kävi korkeimmillaan 1256 ppm klo 10.20. Lokakuun 13 päivän hapotus säädettiin nopeuteen 1,2 ml/m³/h klo 10.23. Huoneen hiilidioksiditaso lähti loivaan laskuun ja tasaantui vaihtelevaan 650 ppm molemmin puolin Annostelu pidettiin samana seuraavaan päivään asti.



Kuva 14. Hiilidioksidilannoitus. Hapotusjakso 7 päivä 2.

Keskiyön aikaan hiilidioksiditaso nousi seuraavan kerran yli tavoitellun 800 ppm ja pysyi sillä tasolla klo 6.00 asti, jonka jälkeen se lähti loivaan laskuun. Alimmillaan hiilidioksiditaso kävi 598 ppm:ssä klo 14.15. 14 lokakuuta annostelu nostettiin 2,4 ml/m³/h klo 14.47. Muutos sai aikaan loivan nousun hiilidioksidipitoisuudessa.

Klo 17.35 hiilidioksiditaso lähti jyrkkään nousuun, vaikka olosuhteita ei huoneessa muutettu. Tavoiteltu hiilidioksiditaso saavutettiin klo 17.40. Hiilidioksiditaso oli korkeimmillaan 1948 ppm klo 19.10. Nousua seurasi hieman loivempi lasku. Hiilidioksiditaso tasoittui vaihtelevaan 955 – 1070 välille klo 23.20 lähtien.



Kuva 15. Hiilidioksidilannoitus. Koe 7 päivä 3.

Hiilidioksidipitoisuus pysyi tasaisena, kunnes se lähti jyrkkään nousuun yöllä 15.10 klo 04.05. Hiilidioksiditaso kävi korkeimmillaan 2325 ppm, jonka jälkeen alkoi nousua loivempi lasku. Hapetusjakso 7 lopetettiin 15 lokakuuta klo 11.27. Hapetusjakson loppuessa hiilidioksiditaso huoneessa oli 840 ppm. Kokeen pituus oli 95 tuntia 17.



Kuva 16. Hiilidioksidilannoitus. Koe 7 päivä 4.

4.8 Kalkin määrä hapotusjaksojen jälkeen

Hapotusjaksojen loputtua astian sisältö oli kerrostunut. Reagoimaton kalkki oli pohjalla ja päällä oli typpihappo sekä reaktion lopputuote. Kalkin kuluminen arvioitiin silmämääräisesti, koska hapotusten välillä astiaa ei tyhjäty tai vaihdettu. Kokeiden jälkeen arvioitiin, että noin puolet kalkista eli noin 250 kg on mahdollisesti kulunut reaktioon. Typpihappoa kokeisiin kului 240 kg. Kokeiden päätyttyä astian sisältö sekoitettiin vielä kunnolla. Tässä vaiheessa reaktio alkoi uudestaan. Reaktion loputtua jäljellejäänyt massa oli koostumukseltaan paksua nestettä.



Kuva 17. Sekoitettu reaktion lopputuote (Kuva: Teo Kanninen)

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tuloksista käy ilmi, että hiilidioksidilannoitus on mahdollista typpihapon ja kalkin reaktiolla. Reaktio nosti huoneen hiilidioksiditasoa annostelusta riippuen hyvinkin korkeisiin lukemiin.

Hapotusjakso 1 osoitti sen, miten nopeasti huoneen hiilidioksiditaso nousee, jos 60 % typpihappoa annostellaan 24 ml/m³/h. Huoneen hiilidioksiditaso nousi 25 minuutin aikana 2292 ppm. Nopea nousu oli odotettavissa ensimmäisellä hapotuskerralla.

Annostelu laskettiin 12 ml/m³/h, jossa sitä pidettiin 8 minuuttia. Hiilidioksiditaso lähti jyrkkään laskuun. Annostelu pidettiin loppukokeen 4,8 ml/m³/h, jolloin hiilidioksiditaso pysyi alle 500 ppm kunnes kokeen lopussa se lähti nousuun. Se miten tehokkaasti hiilidioksidia vapautuu, riippuu

siitä, miten reagoivat aineet sekoittuivat ja reagoivat keskenään. Reaktio oli voimakas, sillä astiassa ei ollut ensimmäisellä koekerralla muuta kuin märkää kalsiittista kalkkia.

Tuuletusluukkujen ollessa automaattilla ei voitu päätellä onko laskettu typpihapon määrä sopiva ylläpitämään 800 ppm:n tasoa huoneessa. Privan datan mukaan luukut olivat kiinni kokeen ajan, mutta silmämääräisten havaintojen perusteella luukut olivat ainakin jossain vaiheessa hapotusjaksoa hieman auki. Ensimmäisten hapotusjaksojen aikana tapahtuneet kasvihuoneautomaatiikkalaitteiston toimintahäiriöt aiheuttivat sen, että osa datasta puuttuu.

Hapotusjakso 3 osoitti sen, että luukkujen ollessa auki ja ilmanvaihdon ollessa suuri 4,8 ml/m³/h 60 % typpihappoa ei saa huoneen hiilidioksiditasoa nousemaan. Tämä pätee kaikkeen hiilidioksidilannoitukseen.

Hapotusjakso 4 tehtiin rajoittamalla luukkujen liikettä niin, että luukut olivat auki suojanpuolella 20 % ja tuulenpuolella 5 %. Tuuletusluukkuja rajoittamalla 4,8 ml/m³/h sai hiilidioksiditason nousemaan yli tavoitellun 800 ppm. Hiilidioksiditason nousu kesti kuitenkin viisi tuntia, kunnes se tasoitui vaihtelemaan 1000 – 1200 välille. Ennen hapotusjaksoja tehtyjen laskelmien perusteella tunnissa kuluisi 6,5 ml/m³/h 60 % typpihappoa. Hapotusjakso 4 osoitti sen, että huoneen hiilidioksiditaso saadaan yli 800 ppm alle 6,5 ml/m³/h annostelulla.

Hapotusjakso 4 vahvisti olettamuksen siitä, että huoneen hiilidioksiditaso kannattaa nostaa kokeen alussa isommalla typpihapon annostelulla. Hapotusjakso 4 kertoi myös sen, että reaktio alkaa hidastumaan, kun astiassa alkaa olemaan enemmän jo reagoinutta ainetta. Tämä johtuu luultavasti siitä, että ilmapumppu ei sekoita kalkkia ja uutta typpihappoa niin tehokkaasti, koska astiassa on jo reagoinutta ainetta samassa kohtaa missä sekoitus tapahtuu.

Hapotusjakso 5 suoritettiin luukut kiinni. Typpihappoa annosteltiin aluksi hetki 4,8 ml/m³/h. Sillä ei kuitenkaan ollut suurta vaikutusta huoneen hiilidioksiditason. Annostelu nostettiin 12 ml/m³/h. Hapotuksen vaikutukset alkoivat näkyä huoneen hiilidioksiditasoissa 25 minuutin päästä. Tämä määrä riitti nostamaan hiilidioksiditason nopeasti yli tavoitteen.

Hapotusjaksossa 5 kokeiltiin, miten korkeaksi huoneen hiilidioksiditaso nousee isommalla annostelulla. Hiilidioksiditaso nousi yli 3000 ppm noin kolme tuntia siitä, kun annostelu aloitettiin 12 ml/m³/h määrällä. Hapotusjakso 5 perusteella hapon annostelu tulee laskea, kuin huoneen hiilidioksiditaso on saavuttanut tavoitetasoon tai hieman ennen tavoitetasoa. Hiilidioksiditaso nousi moninkertaisesti tavoitellun 800 ppm yli.

Hapotusjakso 5 annostelu laskettiin kello 10.57 4,8 ml/m³/h tasolle. Tällä määrällä huoneen hiilidioksiditaso pysyi 1000 – 1300 ppm välillä. Tästä

päätellen hiilidioksidin tavoitetaso pystytään mahdollisesti ylläpitämään annostelemalla 60 % typpihappoa alle 4,8 ml/m³/h, jos huoneen hiilidioksiditaso on ensin nostettu yli tavoitetason isommalla typpihapon annostelulla.

Hapotusjakso 5 lopussa hiilidioksiditaso nousi merkittävästi, vaikka olosuhteet eivät muuttuneet. Hiilidioksiditaso nousi 1700 – 1800 ppm välille, jossa se pysyi noin 30 minuuttia. Tämä ilmiö toistui useasti kokeen aikana. Syitä tähän on ainakin kaksi. Typpihappo ja kalkki sekoittuvat ja reagoivat epätasaisesti kokeen aikana. Hiilidioksidin levitys huoneeseen tasaisesti on myös ongelma, sillä kokeessa tuulettimena käytettiin tavallista pöytätuuletinta.

Hapotusjakso 6 suoritettiin luukut kiinni. Huoneen hiilidioksiditaso nostettiin annostelemalla typpihappoa 24 ml/m³/h ensimmäiset 34 minuuttia. Hiilidioksidin nousu näkyi mittaustuloksissa 30 minuutin jälkeen, kun hiilidioksiditasot alkoivat nousta. Annostelu laskettiin 2,4 ml/m³/h, joka pidettiin kokeen loppuun saakka. Tällä annostelulla saatiin huoneen hiilidioksiditaso nousemaan korkeimmillaan 1290 ppm asti. Annostelun vähentämisen jälkeen huoneen hiilidioksiditaso laski hitaasti ja tasoittui 800 – 900 ppm välille.

Hapotusjaksoista 5 ja 6 saatiin selville, miten tällä menetelmällä päästään tavoiteltuun 800 ppm hiilidioksiditasoon. Tuuletusluukkujen ollessa kiinni, typpihapon annosteluksi riittää 2,4 ml/m³/h, jos hiilidioksiditaso nostetaan hiilidioksidilannoituksen alussa yli tavoitellun 800 ppm tason nopeasti isommalla annostelulla. Saatiin myös selville, että hapotuksen ja huoneen hiilidioksidiarvojen nousun välillä on noin 30 minuutin viive, kun annostelu on 12 - 24 ml/m³/h.

Hapotusjakso 6 kesti melkein koko valotetun ajan. Kun hiilidioksidilannoitus tehtiin manuaalisesti, oli koe 6 kaikista yksinkertaisin ja toimivin tapa toteuttaa hiilidioksidilannoitus. Hiilidioksiditaso pysyi sopivalla tasolla koko kokeen ajan eikä typpihapon annostelua tarvinnut säätää kesken kokeen. Tämän perusteella päivän hiilidioksidilannoitus tehdään siten, että ensimmäiset 30 minuuttia annostellaan 60 % typpihappoa 24 ml/m³/h. Huoneen hiilidioksiditaso ylläpidetään laskemalla annostelu 2,4 ml/m³/h.

Hapotusjakso 7 tehtiin luukut kiinni ja hapotus jatkui neljä päivää katkeamatta. Hapon annostelua muutettiin välillä, mutta tavoitteena oli nähdä, miten huoneen hiilidioksiditaso muuttuu pitkällä aikavälillä. Typpihapon annostelu aloitettiin 12.10 klo 9.20 annostelemalla 24 ml/m³/h. Huoneen hiilidioksidipitoisuus nousi hitaasti. Annostelemalla 24 ml/m³/h vain 15 minuuttia oli liian vähän, koska huoneen hiilidioksiditaso ei ehtinyt nousta tavoiteltuun 800 ppm vaan jäi alle 600 ppm tasolle.

Hapotuksen aloituksesta 15 minuutin kuluttua annostelu laskettiin 2,4 ml/m³/h. Tavoitetasoon päästiin viisi tuntia sen jälkeen, kun annostelu

muutettiin 2,4 ml/m³/h. Pienemmällä typpihapon annostelulla onnistutaan pääsemään tavoitetasoon, mutta se kestää kauan. Hapetusjakso 6 perusteella hapotuksen alussa on järkevää annostella 60% typpihappoa 30 minuuttia, tai kun tavoitetasoon päästään, 24 ml/m³/h ja sitten alentaa typpihapon annostelu sellaiselle määrälle joka ylläpitää huoneen haluttua hiilidioksiditasoa.

Lokakuun 13 klo 10.23 hiilidioksiditasoa kokeiltiin ylläpitää annostelemalla 60 % typpihappoa 1,2 ml/m³/h. Annostelun muuttamishetkellä huoneen hiilidioksiditaso oli noin 1200 ppm eli selkeästi yli tavoitteen. Typpihapon määrä osoittautui liian pieneksi, koska huoneen hiilidioksiditaso laski alle 650 ppm.

Seuraavana päivänä typpihapon annostelu nostettiin takaisin 2,4 ml/m³/h klo 14,47. Huoneen hiilidioksiditaso lähti loivaan nousuun kunne klo 17.55 tapahtui jyrkkä nousu. Hiilidioksiditaso nousi lähes 2000 ppm ilman annostelun muutosta. Nousun jälkeen tapahtui nopea lasku. Tämä johtui mahdollisesti vaihtelevasta aineiden sekoittumisesta kalkkiastiassa. Tämän jälkeen hiilidioksiditaso jäi vaihtelemaan 1000 ppm molemmin puolin. Kokeen perusteella hiilidioksiditason ylläpitoannostelu on lähellä 2,4 ml/m³/h. Annostelemalla 60 % typpihappoa 1,2 ml/m³/h ei ollut tarpeeksi tavoitetasoon ylläpitoon ja 2,4 ml/m³/h ylläpiti hiilidioksiditasoa yli tavoitellun 800 ppm hiilidioksiditason.

Aikaisin aamulla hapotusjakso 7 aikana huoneen hiilidioksiditasot nousivat. Tämä saattaa johtua osaksi kasveista, jotka pimeään aikaan vapauttavat hiilidioksidia. Osaksi tämä voi johtua siitä, miten tehokkaasti typpihappo ja kalkki sekoittuvat. Hiilidioksidi nousi joka yö kokeen 7 aikana, mutta hiilidioksiditasot vaihtelivat merkittävästi öiden välillä, joten mahdollisesti vaihtelut johtuivat pääasiassa reaktion epätasaisuudesta.

Hapetusjaksoissa kävi niin, kuin laboratorikokeista pääteltiin. Ensimmäisten kokeiden aikana huoneen hiilidioksiditaso nousi nopeasti ja korkealle. Hiilidioksiditasot myös laskivat nopeasti hapotuksen päätyttyä. Mitä enemmän typpihappoa oli kalkkiastiassa, sitä hitaammin ja vaimeampana reaktio alkoi. Hapetusjaksojen lopettamisen jälkeen reaktio jatkui sitä pidempään mitä enemmän typpihappoa oli sekoitettu kalkkiin.

Kun kalkin seassa on paljon typpihappoa, kannattaa hapotus aloittaa isomalla annostelulla. Tämä saa aikaan sen, että huoneen hiilidioksiditaso saadaan nopeammin nousuun. Nousun jälkeen annostelu voidaan pienentää, jolloin huoneen hiilidioksiditasoa voidaan ylläpitää. Reaktion hidastuessa hapotuksen voi lopettaa hieman ennen valotusjakson päättymistä, koska huoneen hiilidioksiditasot laskevat hitaasti, jos ilmanvaihto on pientä.

Huoneen hiilidioksidiarvot vaihtelivat suuresti sen mukaan, miten suuri ilmanvaihto oli. Tuuletusluukkujen ollessa auki, huoneen hiilidioksiditasot

eivät nouse riittävästi. Hapetusjakso 4 perusteella hiilidioksidilannoitus onnistuu, jos tuuletusluukkujen asentoa rajoitetaan. Hapetusjaksossa 4 luukut oli rajoitettu aukeamaan tuulenpuolella 5 % ja suojanpuolella 20%. Tällöin ilmanvaihto ei ollut liian nopeaa ja huoneen hiilidioksiditaso pysyi nousun jälkeen yli tavoitetason annostelemalla typpihappoa 4,8 ml/m³/h.

Hiilidioksiditason vaihtelua huoneessa voidaan selittää muillakin asioilla kuin vaihtelevalla ilmanvaihdolla. Hiilidioksidin leviäminen huoneeseen saattoi olla epätasaista. Tuuletus tapahtui yhden pöytätuulettimen avulla. Hiilidioksidin mittauslaitteet olivat huoneen keskellä ja hiilidioksidi tuotettiin huoneen yhdessä nurkassa. On oletettavaa, että hiilidioksiditaso oli paljon korkeampi hiilidioksidin tuotannonurkassa kuin huoneen toisella puolella.

Kasvit käyttävät hiilidioksidia eri määriä olosuhteiden mukaan. Vaikka olosuhteet yritettiin pitää samanlaisina kokeiden aikana, säätilat vaihtelivat kokeiden aikana ja osaltaan vaikuttivat huoneen olosuhteisiin.

Typpihappo ja kalkki sekoitettiin ilmapumpulla. Ilmapumpun aikaan saama liike astiassa ei ollut riittävä. Kokeen loputtua massa sekoitettiin kunnolla ja se sai aikaan vielä voimakkaan reaktion. Reaktio osoitti sen, että astiassa oli vielä paljon reagoimatonta ainetta jäljellä. Ilmapumppu sekoitti massaa vain pinnalta eikä sen voima riittänyt kunnolla sekoittamaan massaa muualta kuin astian keskeltä.

Menetelmällä on haasteita, joiden takia se ei sovellu tällaisenaan käytännön viljelyyn. Hiilidioksidin määrää huoneessa oli vaikea kontrolloida, koska sen tuottava reaktio tapahtuu epätasaisesti. Typpihapon annostelu tehtiin manuaalisesti, mikä on myös ongelmallista, sillä hiilidioksiditasoja tuli seurata jatkuvasti.

Haasteellisin osa tässä menetelmässä tuottaa hiilidioksidia on typpihappo. Typpihappo on voimakkaasti syövyttävä happo ja sen käsittely on hankalaa. Sitä myös tarvitaan suuria määriä. Kokeessa kului kahdeksan 30 kilon typpihappokanisteria. Yhteensä kokeessa kului 240 kg typpihappoa. Kun otetaan huomioon hapotuksen tuntimäärä tässä kokeessa, raaka-aineiden ja työn määrä on huomattava. Työn määrää ja raaka-aineiden kulutusta saadaan kuitenkin vähennettyä, jos menetelmä automatisoidaan.

Jos käytetään dolomiittikalkkia, typpihapon ja kalkin reaktiosta syntyy massa joka sisältää vettä, kalsiumnitraattia ja magnesiumnitraattia. Kalsiumnitraattia ja magnesiumnitraattia käytetään kasvien lannoitteena. Tämän raportin kirjoitushetkellä ei ole täsmällistä tietoa siitä voiko neutralointireaktiosta syntyvää kalkkisalpietaria ja magnesiumnitraattia käyttää kasvien lannoitukseen vai onko liuoksessa jotain, mikä estäisi sen käytön. Alustavien analyysien perusteella tämä neste olisi varsin puhdasta, väkevää kalsium- ja magnesiumnitraattiliuosta, jota voisi käyttää sellaisenaan emoliuoksena.

Hiilidioksidin tuotanto kalkin ja typpihapon reaktiolla ei ole tällaisenaan käytännöllistä. Menetelmä kuitenkin toimii melko hyvin oikeissa olosuhteissa. Menetelmään voisi kehittää laitteet ja säiliön sekä tavan levittää reaktiosta syntyvä hiilidioksidi tasaisesti. Automatisoinnilla raaka-aineiden käyttö olisi tehokkaampaa. Hiilidioksidia tuottaessa on otettava huomioon ilmanvaihto ja reaktion tasainen sekoitus. Typpihapolla on mietittävä turvallinen tapa käsitellä. Kokeiden perusteella olosuhteiden ollessa hyvät, huoneen hiilidioksiditaso pysyi melko tasaisena pitkiä aikoja.

Typpihapon ja kalkin neutralointireaktion käyttö hiilidioksidilannoituksen lähteenä toimii. Huoneen hiilidioksiditaso kannattaa nostaa lannoituksen alussa isommalla typpihapon annostelulla tavoitetasolle. Kokeessa toimiva määrä oli 12 - 24 ml/m³/h kunnes tavoitetasoon päästään. Hapetusjaksoissa 5 ja 6 hiilidioksiditason riittävään nousuun riitti 30 minuutin isompi annostelu, jonka jälkeen typpihapon annostelua voitiin laskea. Sen jälkeen haluttua hiilidioksiditasoa voidaan ylläpitää annostelemalla typpihappoa noin 2,4 ml/m³/h tuuletusluukkujen ollessa kiinni tai 4,8 ml/m³/h jos ilmanvaihto on vähäistä.

LÄHTEET

Earth System Research Laboratory. Viitattu 14.10.2017

<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/weekly.html>

Heimonen, R. & Hänninen, K. (1999). Hiilidioksidin tuotanto olkikompostista kasvihuoneilmaan. Maatalouden tutkimuskeskus

Koivunen, T. (2003). Tehokkaasti Kasvihuoneesta. Gummerus Kirjapaino Oy

Kuva 5, 17. Kanniainen, Teo.

Taulukot. Viitattu 1.5.2017

<http://www.taulukot.com/kemia/hapot/>

Hiilidioksidin määrä

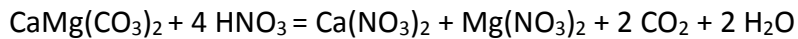
Arvoitu hiilidioksidin määrä on $178 \text{ g/m}^2/\text{vrk}$. Laskettu Lepaan tomaattihuoneen keskimääräinen kulutus elo-, syys- ja lokakuun ajalta ja lisätty 20 %.

Koehuone 64 m^2

$$64 * 178 \text{ g} = 11392 \text{ g}$$

11.4 kg/vrk

Dolomiittikalkki



$$184.39\text{g} + 252.04\text{g} = 164.1\text{g} + 148.33\text{g} + 88,02\text{g} + 36.03\text{g}$$

Dolomiitti (kalkin ja typpihapon tarve)

Ca	+	HNO ₃	=	CO ₂
184.39 g	+	252.04 g	=	88.02 g

Kerroin

$$0,08802 * X = 11,4 \text{ kg}$$

$$11,4 : 0.08802$$

$$X = 159.090909 = 160$$

Ca	+	HNO ₃	=	CO ₂
29,5 kg	+	40,3 kg	=	11,4 kg

$$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 = 26,256 \text{ kg}$$

$$\text{MG}(\text{NO}_3)_2 = 23,7328 \text{ kg}$$

$$2 \text{H}_2\text{O} = 5,7648 \text{ l}$$

$$\text{HNO}_3 \text{ 100\%} = 40,3 \text{ kg}$$

$$40,3 / 1,5129 = 26.637 \text{ (konsentraatio } 24,0 \text{ mol/l)}$$

$$60 \% \text{ konsentraatio } 13,0 \text{ mol/l}$$

$$13x = 26,637 * 24$$

$$x = 639,288 / 13$$

$$X = 49,167 \text{ l}$$

60 % typpihappoa tarvitaan 49.167 l/pv

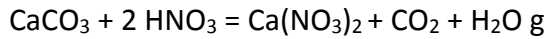
Valotettu aika 18 h

$$49,167 / 18 = 2,7 \text{ l//h typpihappoa} = 2700 \text{ ml} / 416 \text{ m}^3 = 6,5 \text{ ml/m}^3/\text{h}$$

$$29.5 / 18 = 1.64 \text{ kg kalkkia}$$

Hiilidioksidin tuotanto kasvihuoneessa kalkin ja typpihapon neutralointireaktiolla

Kalsiitti



$$100,0869\text{g} + 126,02\text{g} = 164,1\text{g} + 44,01\text{g} + 18,015$$

Kalsiitti (kalkin ja typpihapon tarve)

Ca	+	HNO ₃	=	CO ₂
100,0869	+	126,02	=	44,01

Kerroin

$$0,04401 * X = 11,4 \text{ kg}$$

$$11,4 : 0,04401$$

$$X = 259,032038$$

Ca	+	HNO ₃	=	CO ₂
25,925 kg	+	32,643 kg	=	11,4 kg

$$\text{HNO}_3 \text{ 100\%} = 32,643 / 1,5129 = 21,5764426 \text{ l}$$

$$13x = 21,5764426 * 24$$

$$13x = 517,8346224 / 13$$

$$x = 39,83343249$$

60 % typpihappoa tarvitaan 39,83343249 l/pv

$$2 \text{ H}_2\text{O} = 4,6 \text{ l}$$

$$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 = 42,507 \text{ kg}$$

Valotettu aika 18 h

$$39,83343249 / 18 = 2.2 \text{ l/h typpihappoa } 2200 \text{ ml} / 416 \text{ m}^3 = 5,3 \text{ ml/m}^3/\text{h}$$

$$25,925 \text{ kg} / 18 = 1.45 \text{ kg kalkkia}$$

Koehuoneen tilavuus

$$A = 8,28 \text{ m} * 7,73 \text{ m} = 64,0044 \text{ m}^2$$

$$64,0044 \text{ m}^2 / 2 = 32,0022 \text{ m}^2$$

$$V_1 = 7,73 \text{ m} * 8,28 \text{ m} * 6 \text{ m} = 384,0264 \text{ m}^3$$

$$V_2 = 1/3 * 32,0022 \text{ m}^2 * 1.5 \text{ m}$$

$$V_2 = 16,0011 * 2$$

$$V_2 = 32,0022 \text{ m}^3$$

$$V_3 = 384,0264 \text{ m}^3 * 32,0022 \text{ m}^3 = 416,0262 \text{ m}^3$$

$$V_3 = 416 \text{ m}^3$$