



HIILIDIOKSIDIN TALTEENOTTO PIENPANIMON KESTÄVÄN TUOTANNON NÄKÖKULMASTA

Ammattikorkeakoulun opinnäytetyö
Bio- ja elintarviketekniikka, insinööri (AMK)
Kevät 2024
Jaakko Vilpponen

Bio- ja elintarviketekniikan koulutusohjelma

Tekijä Jaakko Vilpponen

Työn nimi Hiilidioksidin talteenotto pienpanimon kestävä tuotannon näkökulmasta

Ohjaaja Susanna Peltonen

Tiivistelmä

Vuosi 2024

Tämän opinnäytetyön tilaajana toimi Nokian Panimo Oy ja se tehtiin yrityksen tuotannon kehittämistarpeisiin. Työn tavoitteena oli selvittää hiilidioksidin talteenottolaitteiston käyttöönotosta koituvat edut pienpanimon kestävä tuotannon ja taloudellisen kannattavuuden näkökulmasta. Hiilidioksidilla on merkittävä rooli ilmastonmuutoksessa ja pienpanimon tuotannosta väistämättä syntyvä hiilidioksidi päästetään usein suoraan ilmakehään. Työn tarkoituksena oli havainnollistaa, miten pienpanimon tuotannosta peräisin oleva hiilidioksidi vaikuttaa negatiivisesti ilmakehään ja yrityksen talouteen, perustellen näin hiilidioksidin talteenoton ja uudelleenkäytön tuomat edut.

Työssä käytettiin sekä kvalitatiivisia että kvantitatiivisia tutkimusmenetelmiä, keskittyen erityisesti kirjallisuudesta ja aikaisemmista tutkimuksista kerättyyn teoreettiseen viitekehykseen. Teoriaa sovellettiin laskelmissa, joissa arvioitiin panimon etanolifermentaatioissa syntyvän hiilidioksidin talteenoton taloudellisia hyötyjä. Samalla perusteltiin hiilidioksidin talteenoton ja kierrätyksen merkitystä ilmastonmuutokselle.

Työn tuloksena syntyi yleiskatsaus hiilidioksidin roolista panimoteollisuudessa ja ilmastonmuutoksessa. Lisäksi esitettiin kustannuslaskelmia, jotka perustelivat hiilidioksidin talteenottolaitteiston käyttöönoton tuomia taloudellisia etuja. Hiilidioksidin talteenotto ja käyttö on ollut jo vuosikymmenten ajan osa suurten panimoiden tuotantoprosessia. Opinnäytetyö osoitti hiilidioksidin markkinahinnan nousun ja talteenottolaitteiston teknisen kehityksen myötä hiilidioksidin kierrätyksen kannattavuuden myös pienpanimo mittakaavassa.

Avainsanat hiilidioksidin talteenotto, ilmastonmuutos, panimoteollisuus, etanoli, käyminen
Sivut 43 sivua

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Hiilidioksidi ja hiilen kierto.....	2
2.1	Ilmastonmuutos.....	3
2.2	Ilmastotavoitteet	5
3	Hiilidioksidin rooli panimoteollisuudessa.....	6
3.1	Hiilidioksidin käyttö panimossa	7
3.2	Hiilidioksidin liukeneminen veteen	8
3.3	Hiilidioksidin muodostuminen panimossa.....	12
4	Hiivan aerobinen aineenvaihdunta.....	13
5	Hiivan anaerobinen aineenvaihdunta eli käyminen	15
6	Oluen valmistusprosessi	17
7	Hiilidioksidin talteenotto	18
7.1	CCS – Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi	21
7.2	CCU – Hiilidioksidin talteenotto ja hyödyntäminen.....	21
8	Hiilidioksidin talteenottotekniikat	22
8.1	Ennen polttoa tapahtuva talteenotto (post - combustion)	22
8.2	Polton jälkeen tapahtuva talteenotto (pre - combustion).....	23
8.3	Happipolttot talteenotto (oxy - fuel).....	23
9	Hiilidioksidin talteenotto panimoteollisuudessa.....	24
10	Pienpanimon hiilidioksidin talteenottotekniikka	25
10.1	Talteenottolaitteisto kaasupallolla.....	26
10.2	Talteenottolaitteisto korkeapainekompressorilla	27
11	Panimon hiilidioksidin tuoton arvioiminen	29
12	Tulokset	31
12.1	Talteen otettavan hiilidioksidimäärän teoreettinen laskeminen	31
12.2	Nestemäisen hiilidioksidivaraston kokoluokan määrittäminen	32
12.3	Talteenottolaitteiston käyttöönotosta saatavat taloudelliset hyödyt.....	33
12.4	Laitteistojen vertailu	34
13	Pohdinta & Johtopäätökset	35
	Lähteet.....	38

Kuvat

Kuva 1. Hiilen kierto.....	3
Kuva 2. Maapallon ilmakehän hiilidioksidipitoisuus	4
Kuva 3. Kasvihuonekaasupäästöt kaasuittain 2021	5
Kuva 4. Hiilidioksidin arvo kasvaa.....	7
Kuva 5. Hiilidioksidimolekyylin ja vesimolekyylin molekyyli mallit.	9
Kuva 6. Hiilihappomolekyylin molekyyli malli	10
Kuva 7. Diffuusiokivi	11
Kuva 8. Hiilidioksidin tasapainorektio.....	12
Kuva 9. Käymiskelpoiset sokerit	12
Kuva 10. Soluhengitys.....	15
Kuva 11. Oluen valmistusprosessi	18
Kuva 12. Hiilidioksidin talteenotto, varastointi ja käyttö – CCUS.....	19
Kuva 13. Toiminnassa ja kehitysvaiheessa olevat ja CCS - laitokset.....	20
Kuva 14. CCUS - laitokset: kokonaiskapasiteetti ja uusien laitosten kapasiteetti vuosina 1972	21
Kuva 15. Sähkön- ja lämmöntuotannon lohkokaavio, jossa käytetään ennen polttoa tapahtuvaa hiilidioksidin talteenottomenetelmää	23
Kuva 16. Sähkön- ja lämmöntuotannon lohkokaavio, jossa käytetään polton jälkeen tapahtuvaa hiilidioksidin talteenottomenetelmää	23
Kuva 17. Sähkön- ja lämmöntuotannon lohkokaavio, jossa käytetään happipolttua hiilidioksidin talteenottomenetelmänä	24

Kuva 18. Hiilidioksidin talteenotto	26
Kuva 19. Dalumin talteenottolaitteisto.....	28
Kuva 20. Dalum laitteiston kompakti koko	29
Kuva 21. Käymisen seuranta	30
Kuva 22. Tulevaisuuden kustannukset eri talteenottotekniikoilla	35

1 Johdanto

Tämä opinnäytetyö tehdään Nokian Panimo Oy:n tuotannon kehittämistarpeisiin. Työn käsiteltävinä aiheina ovat hiilidioksidin rooli panimoteollisuudessa ja ilmastonmuutoksessa. Työ valikoitui Nokian Panimon osoittaman kiinnostuksen myötä, mahdollisen hiilidioksidin talteenottolaitteiston hankintaa koskien. Työssä perehdytään etanolifermentaation sivutuotteena muodostuvan hiilidioksidin talteenoton ja käytön merkityksiin ja sen tavoitteena on informatiivisen ja kattavan teoriakokonaisuuden muodostaminen, joka osaltaan arvioi ja perustelee hiilidioksidin talteenottolaitteiston hankinnan tuomia hyötyjä pienpanimolle – kestävän kehityksen ja taloudellisen kannattavuuden näkökulmista. Työn tutkimusosuus hyödyntää pääosin kvalitatiivisia menetelmiä ja se nojaa vahvasti kirjallisuudesta ja aikaisemmista tutkimuksista kerätyn teoreettisen viitekehyksen hyödyntämiseen. Teoriatietoa hyödynnetään työssä hiilidioksidin talteenotosta koituvien taloudellisten hyötyjen laskentaan kvantitatiivisia menetelmiä hyväksikäyttäen. Laskentaan käytetään hyväksi eri talteenottolaitteistoja tarjoavien yritysten antamia lukuja, jotka ovat sähköpostikeskustelujen perusteella saatuja. Teoreettisen viitekehyksen ja yrityksiltä saatujen lukujen perusteella tehtyjen laskelmien avulla työ pyrkii vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Mikä on hiilidioksidin rooli ilmastonmuutoksessa?
- Mihin hiilidioksidia käytetään panimoteollisuudessa?
- Miten hiilidioksidia syntyy oluen valmistusprosessissa?
- Miksi hiilidioksidin talteenotto on kannattavaa pienpanimon taloudellisen ja kestävän tuotannon näkökulmista?

Hiilidioksidi on merkittävä kasvihuonekaasu, mutta myös yleisesti käytetty raaka- ja apuaine juoma- ja panimoteollisuudessa. Se on olennainen osa oluen valmistusprosessin sujuvuutta eri työvaiheissa, kuten juomien karbonoinnissa ja astioinnissa. (Pennanen, 2023) Nokian Panimon alkoholikäymisessä syntyvä hiilidioksidi vapautetaan ilmakehään, ja panimon tuotannon eri osaprosesseissa käytössä oleva hiilidioksidi ostetaan talon ulkopuoliselta toimittajalta. Etanolifermentaation sivutuotteena muodostuvan hiilidioksidin kierrätys panimon omaan käyttöön vähentäisi merkittävästi hiilidioksidin ostotarvetta. Samalla varmistettaisiin, ettei Euroopan markkinoilla mahdollisesti esiintyvä elintarvikekäyttöön tarkoitettun hiilidioksidin saatavuus- ja laatuongelmat vaikuttaisi yrityksen toimintaan.

Hiilidioksidin talteenotto, varastointi ja käyttö (CCUS) on ilmastonmuutoksen torjunnan, ja taloudellisen kannattavuuden potentiaalinsa ansiosta herättänyt kiinnostusta globaalisti. Hiilidioksidin kierrätys vähentää merkittävästi yrityksen hiilidioksidijalanjälkeä ja riippuvuussuhdetta fossiililla polttoaineilla tuotetun hiilidioksidin markkinoihin. (Atlas

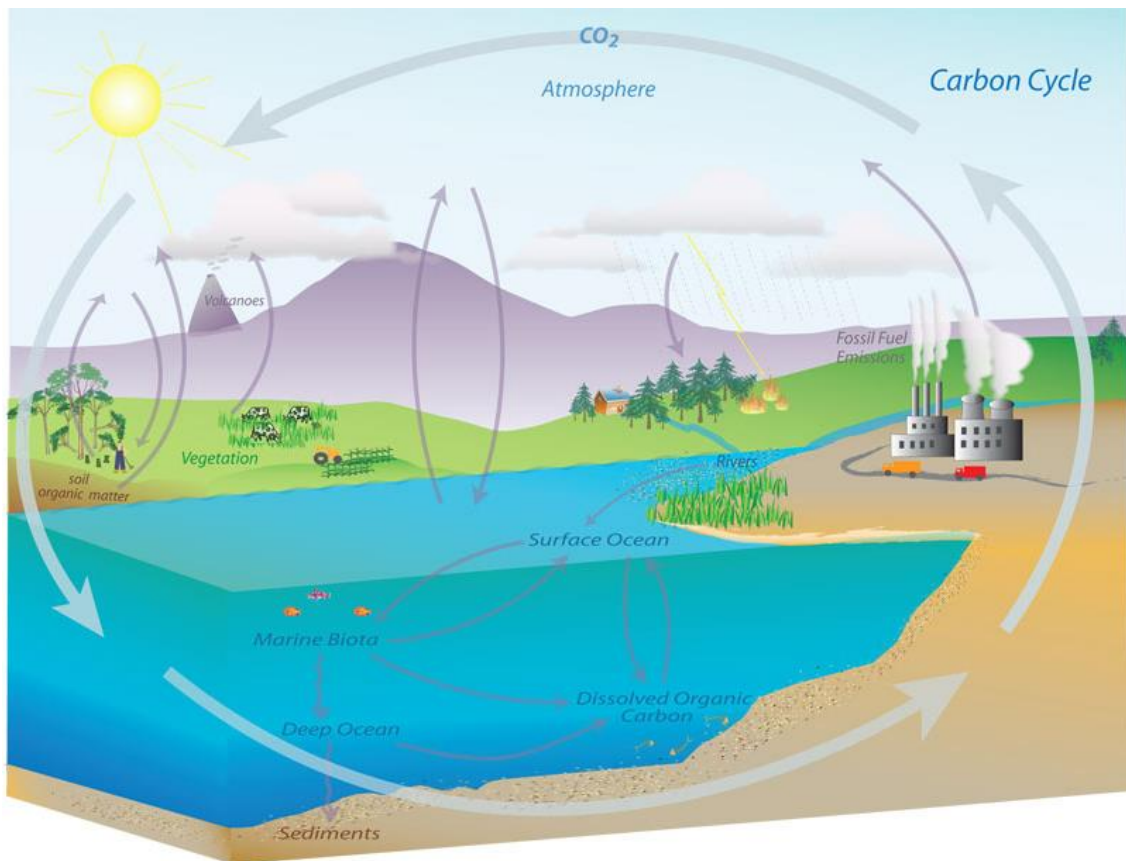
Scientific, 2023). Alkoholikäymisessä syntyneen hiilidioksidin talteenotto on jo osa isompien panimoiden tuotantoa, mutta pienpanimoiden mittakaavassa kierrättäminen on harvinaisempaa. Nokian Panimo voisi olla yksi suunnan näyttäjistä kohti pienpanimoiden kestävämpää tuotantoa Suomessa. Ilmastonmuutoksen hidastaminen kasvihuonekaasupäästöjä vähentämällä on konkreettinen ja tärkeä toimenpide kohti kestävämpää tulevaisuutta ja maapallon hyvinvointia. Suomi ja Euroopan unioni ovat sitoutuneet vuonna 2015 solmitun Pariisin ilmastopöytäkirjan tavoitteisiin vähentää hiilidioksidipäästöjään, ja edistää kestävästä kehityksestä, lisäämällä uusiutuvien energialähteiden käyttöä ja tehostamalla energiatehokkuuttaan. (Ulkoministeriö, n.d.)

2 Hiilidioksidi ja hiilen kierto

Hiili on korvaamaton alkuaine elämälle maapallolla. Se säätelee maapallon lämpötilaa, ja tarjoaa ravintoa ja energiaa muiden eliöiden käyttöön. Fotosynteesissä kasvit käyttävät auringon energiaa muodostaakseen sokerimolekyylejä ilmakehän hiilidioksidin ja veden kanssa. Eläimet syövät kasveja, ja kuluttavat sokerimolekyylejä saadakseen energiaa. Hiilidioksidia vapautuu ilmakehään kasvien ja eliöiden hengityksen mukana, sekä orgaanisten aineiden palamisen ja mätänemisen seurauksena. Myös kuumat lähteet, geysirit ja tulivuorten purkaukset vapauttavat hiilidioksidia, kun taas meret ja metsät sitovat, eli poistavat hiilidioksidia ilmakehästä. Meret ovatkin merkittävimpiä hiilinieluja maapallolla. (Helen, 2020)

Yhdestä hiiliatomista ja kahdesta happiatomista koostuvalla hiilidioksidilla on yhdessä muiden kasvihuonekaasujen kanssa elintärkeä rooli maapallon elinolosuhteiden ylläpitämisessä. Yhdessä muiden kasvihuonekaasujen kanssa se estää maapallon lämpöenergian karkaamista avaruuteen. Ilman kasvihuonekaasuja maan pinnan lämpötila olisi arviota 33 °C kylmempi. (Helen, 2020) Maapallo pyrkii säilyttämään dynaamisen tasapainon hiilivarastojen ja ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden välillä hiilen kierron avulla (Kuva 1). Tasapainotilan saavat aikaan biokemialliset kierrot: nopea biosykli ja hidas geosykli, joiden avulla saavutetaan luonnollinen balanssi hiilen kiinteään ja kaasumaisen olomuodon suhteen. (Bovet ym., n.d./2008, ss. 149–150)

Kuva 1. Hiilen kierto (mukaillen, National Oceanic and Atmospheric Administration, n.d.).



2.1 Ilmastonmuutos

Kasvihuonekaasut vaikuttavat eliöiden ja ihmiskunnan toimintaan lämmittämällä ilmastoa ja muuttamalla maapallon ekosysteemejä (Suomen ympäristökeskus, 2023).

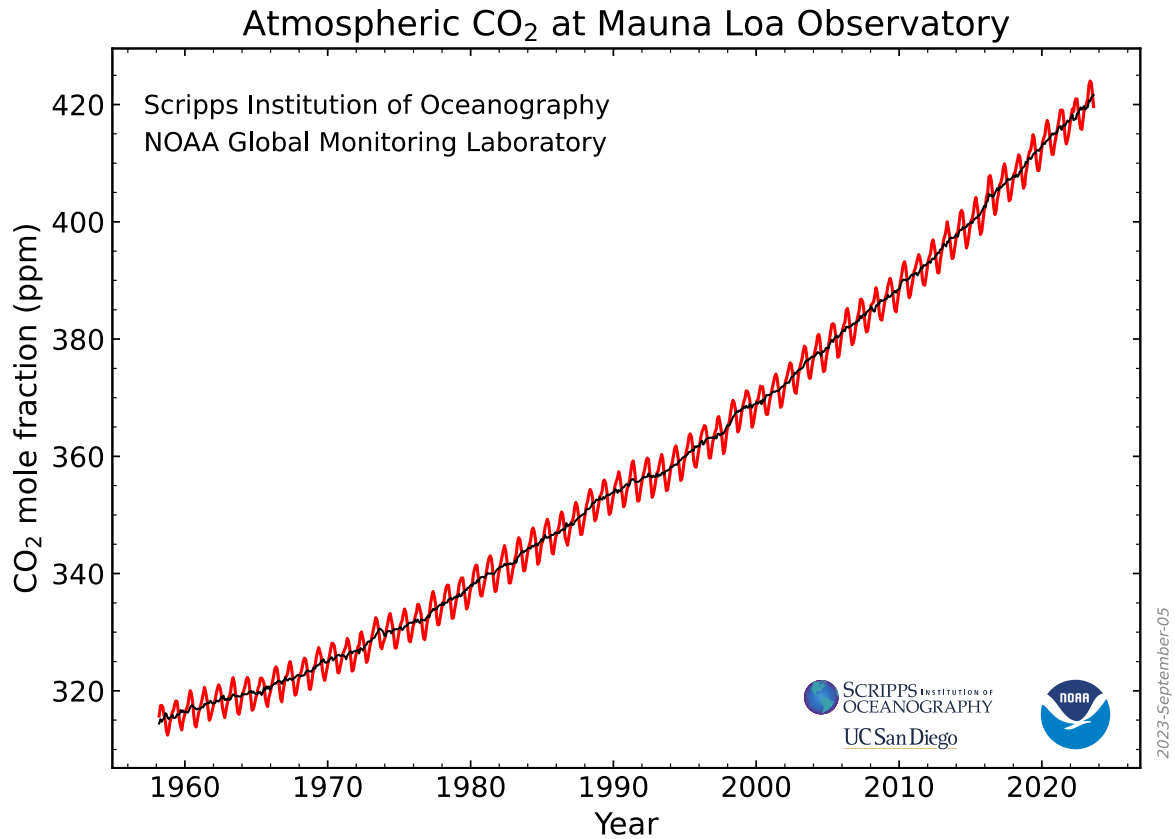
Ilmastonmuutoksen merkittävimpänä syynä voidaan pitää ilmakehän luonnottoman suurta hiilidioksidipitoisuutta. Teollisesta vallankumouksesta lähtien maapallon hiilen tasapainotila on ollut häiriintynyt, kun maaperään miljardien vuosien aikana sitoutunutta hiiltä on vapautettu takaisin ilmakehään nopealla tahdilla. (Bovet ym., n.d./2008, ss. 149–150)

Hiilidioksidin määrä ilmakehässä on noussut teollistumista edeltävästä ajanjaksosta n. 40 %, ja jatkaa nousemistaan keskimäärin 2ppm:n vuosivauhtia (Ilmasto-opas, n.d.-a).

Hiilidioksidipäästöjen trendin jatkuessa, ennustettu ilmakehän hiilidioksidipitoisuus saavuttaisi noin 800:aan ppm lukeman vuosisadan lopussa. (Abbot ym., 2017, s. 189) Hiilen luonnollisessa kierrossa yksittäisen hiilidioksidimolekyylin viipymä ilmakehässä on keskimäärin viisi vuotta, mutta ihmisen toiminnan myötä yksittäisen hiilidioksidimolekyylin aika ilmakehässä on noussut satoihin vuosiin. (National Oceanic and Atmospheric Administration, n.d.) Päästöjen vähentäminen ja hiilinielujen kasvattaminen ovat tärkeimpiä ilmastotoimia taistelussa ilmastonmuutosta vastaan (Suomen ympäristökeskus, 2023).

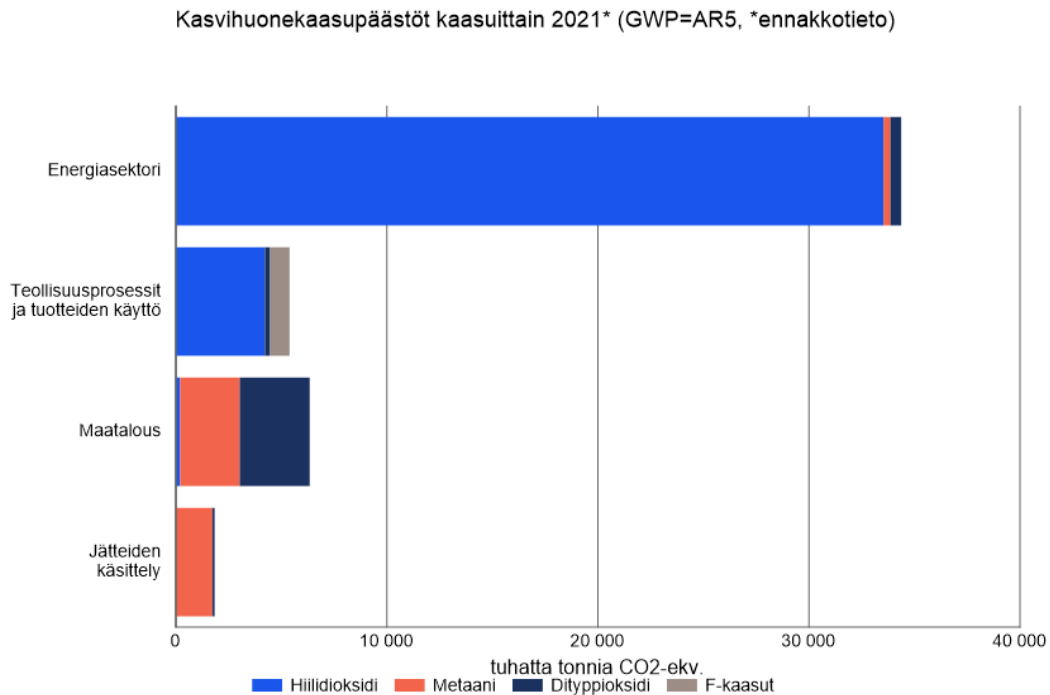
Maapallon ilmakehän hiilidioksidipitoisuuksia on mitattu Mauna Loa Observatoriossa Havaijilla vuodesta 1958 lähtien (Kuva 2).

Kuva 2. Maapallon ilmakehän hiilidioksidipitoisuus (mukailen Global Monitoring Laboratory, n.d.).



Ilmakehän voimakkaasti kasvaneesta hiilidioksidin määrästä suuri osa on liuenneena veteen. Se on synnyttänyt meriin hiilihappoa ja edelleen bikarbonaatti-ioneja, mikä on johtanut meriveden happamoitumiseen. Viimeisen 250 vuoden aikana meriveden pH on laskenut luvusta 8,25 lukuun 8,14. pH asteikon ollessa logaritminen, tämä tarkoittaa H^+ -ionien määrän kasvua noin kolmanneksella lähtötilanteesta. (Korteniemi, 2016) Energiasektori on niin globaalisti, kuin suomessakin suurin kasvihuonekaasujen päästölähde (Kuva 3), muodostaen tilastokeskuksen ennakkotietojen mukaan noin 72 % kokonaispäästöistä, mikä tarkoittaa 34,4 miljoonaa tonnia CO₂ -ekv vuonna 2021 (Tilastokeskus, 2022).

Kuva 3. Kasvihuonekaasupäästöt kaasuihin 2021* (GWP=AR5, *ennakkotieto), (Tilastokeskus, 2022).



Lähde: Tilastokeskus, kasvihuonekaasut

2.2 Ilmastotavoitteet

Kansainvälisen ilmastopuitesopimuksen tavoitteena on ihmistoiminnan aiheuttamien kasvihuonekaasupäästöjen vakauttaminen vaarattomalle tasolle, ja se kattaa Suomen lisäksi 196 valtiota. Vaikka ilmastopuitesopimus ei sisällä määrällisiä velvoitteita, asettaa se kansainvälisille ilmastomuutoksen hillitsemistavoitteille periaatteet ja muut yleiset puitteet. Ilmastopuitesopimuksen osapuolet ilmoittavat kansalliset kasvihuonekaasupäästönsä ja hiilinielunsa vuosittain. Tärkeimmät ilmastopoliittiset linjaukset globaalissa mittakaavassa ovat:

- YK:n ilmastomuutosta koskeva ilmastopuitesopimus (1992) – voimaan 1994
- Kioton sopimus (1997) – voimaan 2005
- Pariisin ilmastopuitesopimus (2015) – voimaan 2016

(Ympäristöministeriö, n.d.-a)

Kioton sopimus on Yhdistyneiden Kansakuntien runkosopimus, joka velvoittaa teollisia valtioita rajoittamaan kasvihuonekaasupäästöjään. Sen yhtenä päätarkoituksenaan on auttaa osapuolia sopeutumaan ilmastomuutoksen kielteisiin vaikutuksiin. (United Nations, n.d.)

Vuonna 2015 solmittu Pariisin ilmastosopimus koskee vuoden 2020 jälkeistä aikaa, ja sen on allekirjoittanut 193 valtiota. Sopimus ensimmäinen sitova globaali sopimus, joka velvoittaa osapuolia vähentämään päästöjään. Sopimuksen tavoitteena on rajoittaa ilmaston lämpeneminen alle kahteen asteeseen suhteessa esiteolliseen aikaan, sekä pyrkimyksenä rajoittaa lämpeneminen 1,5 asteeseen. (Ympäristöministeriö, n.d.-a) Pariisin sopimuksen tavoitteena on kääntää globaalit kasvihuonekaasupäästöt laskuun mahdollisimman nopeasti, ja pyrkimyksenä saavuttaa tasapaino ihmisen aiheuttamien kasvihuonekaasupäästöjen ja globaalien hiilinielujen välille tämän vuosisadan jälkipuoliskoon mennessä. Sopimuksen osapuolet ovat sitoutuneet laatimaan, tiedottamaan ja saavuttamaan kunnianhimoiset ja ajan myötä kiristyvät kansalliset panostuksensa / toimensa viiden vuoden välein. Kansalliset panostukset pitää sisällään toimia mm. päästöjen vähentämiseksi, ilmastonmuutokseen sopeutumiseksi, ilmastorahoituksen ja läpinäkyvyyden lisäämiseksi sekä teknologian kehittämiseksi. (Ympäristöministeriö, n.d.-b)

Kansainvälisten ilmastotavoitteiden lisäksi Suomi on laatinut uuden kansallisen ilmastolain, jonka tavoite on saavuttaa hiilineutraalius vuoteen 2035 mennessä. 1.7.2022 voimaan astunut laki päivitti Suomen päästövähennystavoitteet vuoteen 2050 asti. Uudet päästövähennystavoitteet ovat (verrattuna vuoden 1990 tasoon):

- -60 % vuoteen 2030 mennessä
- -80 % vuoteen 2040 mennessä
- -90 % vuoteen 2050 mennessä

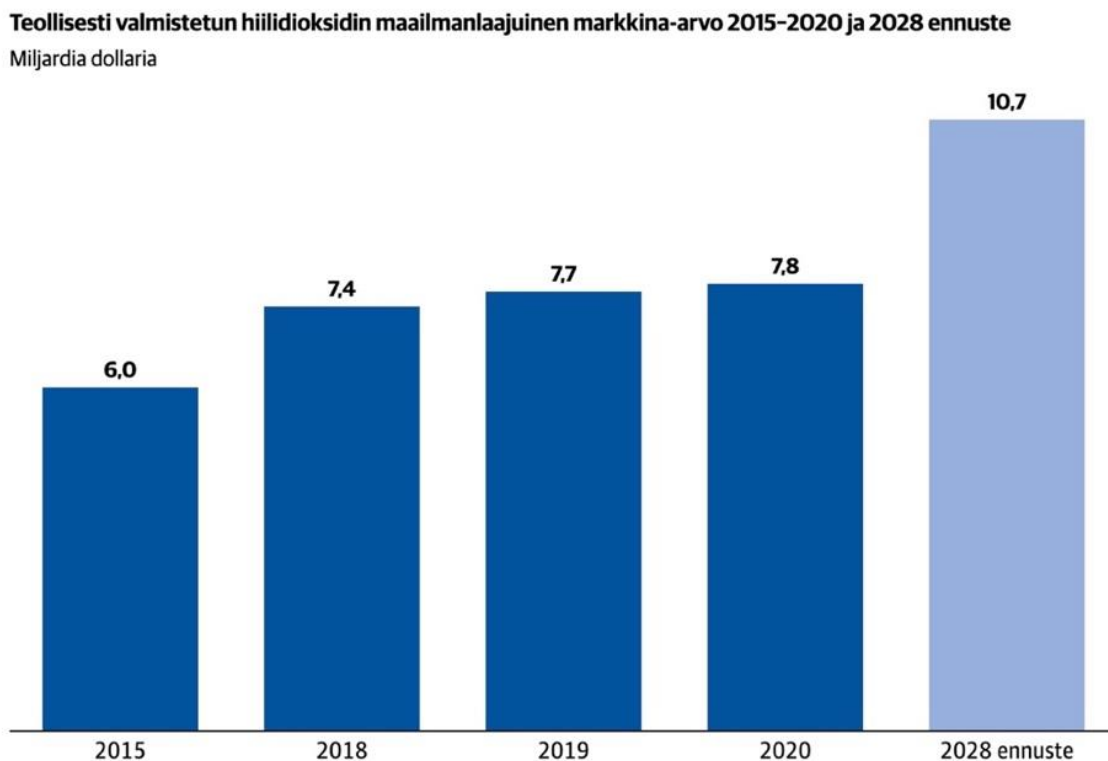
(Ympäristöministeriö. n.d.-c)

3 Hiilidioksidin rooli panimoteollisuudessa

Hiilidioksidilla on tärkeä rooli oluen ja virvoitusjuomien suutuntumassa, säilyvyydessä ja valmistusprosessissa. Virkistävän, hiilihappopitoisen juoman valmistusperiaate on ollut tiedossa jo vuodesta 1772 lähtien, jolloin kemisti Joseph Priestley julkaisi tutkimustuloksensa hiilidioksidilla kyllästetystä vedestä. Nykyään hiilihapotetuissa juomissa on keskimäärin 2,5–4,5 tilavuusprosenttia hiilidioksidia. (Ansari ym., 2020, s. 3) Panimoteollisuudessa käytettävän hiilidioksidin tulee olla laadukasta, hajutonta ja puhdasta ettei se vaikuttaisi juoman makuprofiiliin tai säilyvyyteen negatiivisesti. Raikkaan suutuntuman lisäksi hiilidioksidi toimii juomassa säilöntäaineen tavoin estämällä home ja bakteeriaktiivisuutta. Hiilidioksidia käytetään juomien hiilihapotuksen lisäksi tankkien paineistuksessa ja puhalluksessa, hapen syrjäyttämisessä astioinnissa sekä paineensiirrosta ja tankkien puhdistuksessa. (Air Liquide, n.d.)

Panimoalalla käytettävää hiilidioksidia saadaan muun teollisuuden oheistuotteena erotusprosessin avulla muun muassa maakaasun esikäsitteystä ja ammoniakkin valmistuksesta. (Teir ym., 2011, s. 11) Suomessa puhtaan hiilidioksidin valmistus on suurinta Porvoon Kilpilahdessa, jossa maakaasua käytetään vedyn valmistukseen öljyn jalostusta varten. Prosessin sivutuotteena saadaan hiilidioksidia, jota – puhdistuksen jälkeen – vieään virvoitusjuomateollisuuden käyttöön myös Ruotsiin. (Koponen, 2018) Suomen markkinoilla hiilidioksidia toimittavat yritykset ovat: Linde, Woikoski, ja Air Liquide. Maakaasun saatavuus ja hinta korreloi suoraan hiilidioksidin saatavuuteen ja markkinahintaan (kuva 4) Venäjä on ollut suuri ammoniakkin ja maakaasun viejä. Ukrainan kriisin yhteydessä Venäjää vastaan asetettujen rajoitteiden myötä raaka-aine pula on nostanut hintoja korkealle – energiakriisi on sulkenut hiilidioksidin talteenottolaitoksia, ja ajanut panimoita ongelmiin ympäri maailmaa. (Drake ym., 2022)

Kuva 4. Hiilidioksidin arvo kasvaa (mukaillen Drake ym., 2022).



3.1 Hiilidioksidin käyttö panimossa

Hiilidioksidia voidaan kutsua oluen viidenneksi raaka-aineeksi veden, maltaan, humalan ja hiivan lisäksi. Hiilidioksidia käytetäänkin lähes kaikkialla panimon kellarissa, astioidissa ja taproomissa. (Gribbins, 2022) Valmistusprosessissa käytettävä hiilidioksidi varastoidaan nestemäisenä panimon varastosäiliössä, josta se johdetaan haihduttimen kautta eri puolille

panimoa kaasufaasissa. Kaasu säädetään haluttuun paineeseen paineensäätöventtiilin avulla, ja johdetaan putkistoa pitkin suodattimen läpi käyttökohteeseensa. Hiilidioksidi on inerttikaasu, mikä tarkoittaa se reagoimattomuutta suoraan yhdisteen tai tuotteen kanssa. Inertointi on tapahtuma, jossa aine muunnetaan syttyvästä tai reaktiivisesta tilasta turvalliseen ja epäreaktiiviseen tilaan korvaamalla hapetta sisältävä ilma inertillä kaasulla. (Biosykli, 2022) Tästä syystä hiilidioksidia käytetään yleisesti myös palosammuttimissa. Panimossa hiilidioksidilla on tärkeä rooli hapen syrjäyttäjänä, eritoten astioinnissa. Astioinnissa tölkki esitätetään hiilidioksidilla ennen oluen lisäämistä, joka paitsi poistaa tölkestä hapen niin auttaa hallitsemaan vaahdonmuodostusta sekä säilyttämään tölkin hiilidioksidipitoisuutta ennen avaamista. Kansituksen yhteydessä juoman ja kannen väliin jäävä, hapetta sisältävä ilmatila syrjäytetään hiilidioksidisykäyksellä ennen kannen kiinni laittoa. Näin olut pysyy tuoreena pidempään, ja sen säilyvyys paranee. Hiilidioksidia käytetään panimoissa hapen syrjäyttäjänä myös mm. kuivahumaloinnissa. (CO2 Meter, 2016) Hiilidioksidilla on merkittävä rooli myös panimon laitteiston ja tankkien yleisen puhtauden ylläpitämisessä. Tankkien puhallukset & tyhjennykset mm. kiertopesujen jälkeen tehdään puhtaalla hiilidioksidilla, jolla varmistetaan tuotteen kanssa kosketuksissa olevien pintojen hygieenisuus. (Gribbins, 2022)

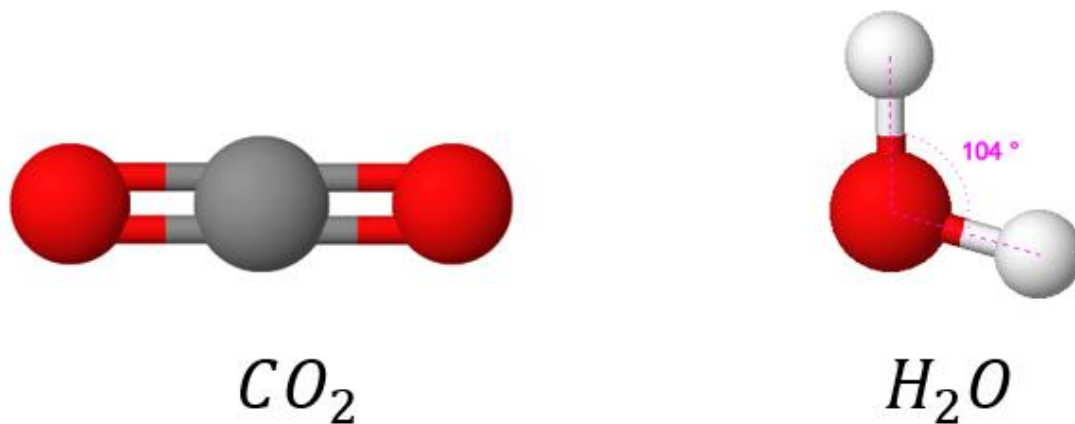
Muita tärkeitä kohteita hiilidioksidin käytölle panimossa on ravintola-astioiden (kegien) tyhjennyksessä ja täytössä, jossa sitä käytetään paineen muodostajana astiaan. Paine auttaa juoman hiilidioksidipitoisuuden tasapainottamisessa. Ravintolassa hiilidioksidilla varustettu hanatekniikka mahdollistaa oluen virtauksen painovoimaa vastaan kellarista ravintolan oluthanoille ilman erillistä pumppua, ja vakauttaa juoman hiilidioksidipitoisuutta siirron aikana. (Leiden, 2019) Panimossa hiilidioksidipainetta käytetään tuotelaadun varmistamiseen, kun tankista toiseen tehtävät raaka-aine siirrot toteutetaan hiilidioksidin avulla. Menetelmä ylläpitää hyvää hygieniaturvallisuutta sekä minimoi hapen aiheuttamaa tuotelaaturiskiä. (Gribbins, 2022)

3.2 Hiilidioksidin liukeneminen veteen

Kuuluvaa juomaa valmistettaessa kaasun tulee liueta veteen. Hiilidioksidi on lineaarinen molekyyli, jossa on kaksi samanlaista kovalenttista sidosta hiilen ja kahden happiatomin välillä (Kuva 5). Molekyyli rakenteensa ansiosta hiilidioksidin liukenevuus veteen on muita kaasuja parempi (Gallagher, 2023) ja sen käyttöä juomien karbonoinnissa voidaan perustella monin eri tavoin (Edinburgh Sensors, 2022). Vaikka molekyyli on symmetriansa ansiosta pooliton, on sillä osittaisia negatiivista varausta hapen ollessa hiiltä elektronegatiivisempi. Osittaisen negatiivisen varauksen ansiosta vesi sitoo hiilidioksidia muita kaasuja voimakkaammin. (Gallagher, 2023) Muiden veteen liukenevien kaasujen ollessa

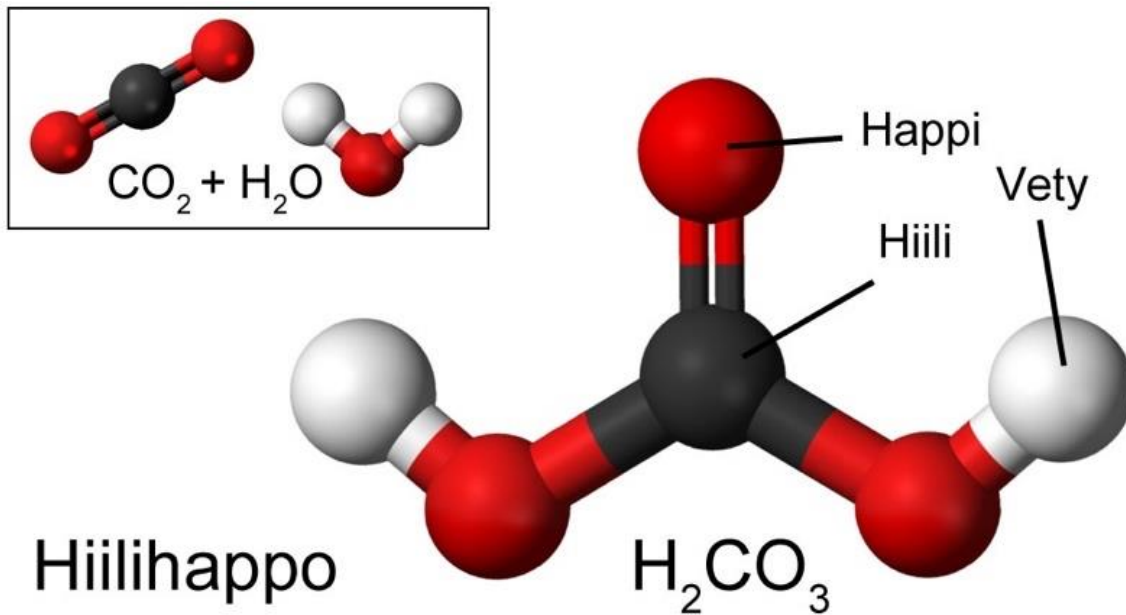
pääsääntöisesti myrkyllisiä nautittavaksi, on hiilidioksidin käyttö juomien karbonoinnissa perusteltua ja järkevää. Hiilidioksidi on erittäin stabiili veteen liuetessaan, ja toisin kuin muut veteen liukenevat kaasut – joiden mukana veteen muodostuu ei-toivottuja sivutuotteita – hiilidioksidi muodostaa veden kanssa hiilihappoa. Muiden muassa edellä mainittujen piirteiden ansiosta hiilidioksidia on muita kaasuja paremmin tarjolla, ja sitä on edullisempi käyttää panimoteollisuudessa. Tämän lisäksi hiilidioksidin ominaisuudet juoman säilyvyyden parantajana ovat ylivoimaiset muihin kaasuihin verrattuna. (Edinburgh Sensors, 2022)

Kuva 5. Hiilidioksidimolekyylin ja vesimolekyylin molekyyli mallit (Jyväskylän yliopisto, 2023).

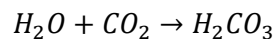


Hiilidioksidin liukenemista veteen voidaan tarkastella Henryn lain avulla. Henryn laki perustuu englantilaisen kemisti William Henryn oivallukseen kaasun paineen ja sen liukoisuuden välillä. Lain mukaan kaasun liukoisuus nesteeseen on suoraan verrannollinen sen osapaineeseen systeemissä. Huolimatta siitä, mitä muiden systeemissä olevien kaasujen osapaineelle tapahtuu, kaksinkertaistettaessa hiilidioksidin osapaineen kaksinkertaistetaan myös sen liukoisuus. Kun oluttölkki avataan, täytön yhteydessä juoman ja kannen väliin johdetun hiilidioksidin osapaine laskee yllättäen, joka saa aikaan hiilidioksidin vapautumisen nesteessä kuplien muodossa. (Carnegie Mellon University, 2023) Kun hiilidioksidi liukenee veteen, muodostuu hiilihappoa (Kuva 6). Tapahtumareaktio pyrkii saavuttamaan kemiallisen tasapainon hiilidioksidin ja liuenneen hiilihapon välille. Le Chatelierin periaatteen mukaan tasapainossa olevaan reaktioseokseen vaikuttava ulkoinen tekijä muuttaa reaktiota siihen suuntaan, jossa häiriö lievenee. Kaasujen kohdalla ulkoiset tekijät ovat paineen, lämpötilan tai konsentraation muutoksia. (Myllyviita, n.d.) Mitä korkeampi hiilidioksidin osapaine ja mitä matalampi lämpötila, sitä enemmän hiilidioksidia liukenee veteen. Kun veden hiilidioksidikonsentraatio kasvaa, sen hiilihappopitoisuus nousee. (Gallagher, 2023)

Kuva 6. Hiilihappomolekyylin molekyyli malli (mukaillen, Korteniemi, 2016).



Hiilidioksidi CO_2 veteen liuotettuna = hiilihappo H_2CO_3



Oluen hiilihapotukseen on erilaisia tyyplejä. Pienimmissä käsityöläispanimoissa yleisenä ratkaisuna käytetään oluen karbonointia (force carbonation) diffuusiokiven avulla. Diffuusiokiviä on monenlaisia (Kuva 7), ja niitä voidaan käyttää suoraan joko tankin / painetankin sisälle asennettuna, tai oluen siirtolinjaan kytkettynä (in - line). Menetelmä perustuu hiilidioksidin pakottamiseen / johtamiseen onttoa metallisylinteriä pitkin paineen alaisuudessa. Sylinterin toinen pää on varustettu pienillä rei'illä, jolloin hiilidioksidi purkautuu olueen pieninä kuplina. Suuri määrä pieniä kuplia muodostaa suuren pinta-alan, mikä painetankin paineen ja matalan lämpötilan kanssa luo suotuisat olosuhteet hiilidioksidin liukenemiselle. Suuremmissa panimoissa on käytössä monimutkaisempia ja tarkempia menetelmiä, joissa hiilidioksidia johdetaan oluen sekaan hallitummin siirron yhteydessä. Nämä järjestelmät keskittyvät suuriin volyymeihin, tarkkaan liukenemisasteisiin ja nopeisiin prosessiaikoihin, ollen kustannuksiltaan moninkertaisia yksinkertaisen diffuusiokiven käyttöön verrattuna. (Gribbins, 2022)

Kuva 7. Diffuusiokivi (mukaillen Hengko, n.d.).

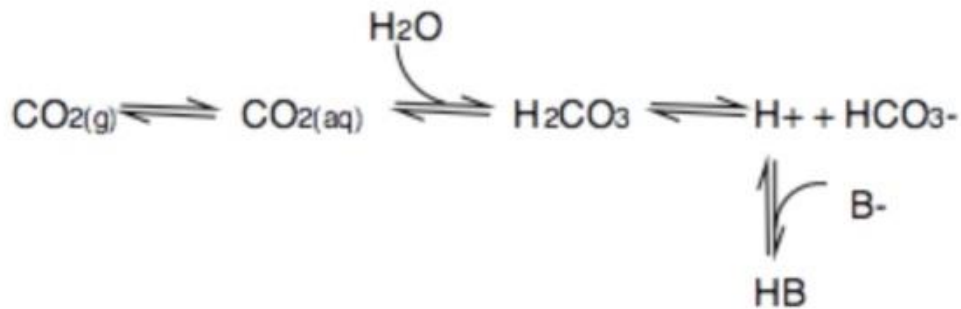


Toisena merkittävänä esimerkkinä – kuplivan juoman valmistamisen lisäksi – hiilidioksidin kyvystä liueta veteen voidaan pitää valtamerien happamoitumista. Henryn lain ja Le Chatelierin periaatteen mukaisesti myös maapallon ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden nousu aiheuttaa hiilidioksidin osapainemuutoksen systeemissä. Viimeisen 200 vuoden aikana jyrkästi kohonnut hiilidioksidipitoisuus ilmakehässä vaikuttaa valtamerien pH arvoon hiilidioksidin liueta mereen kiihtyvällä tahdilla. Hiilidioksidin muuttuessa hiilihapoksi, se laskee veden pH arvoa, joka ajan myötä vaikuttaa valtamerien luonnolliseen ekosysteemiin muuttamalla veden karbonaattikonsentraatiota. Hiilidioksidin tasapainoreaktio siirtyy tarvittaessa hiilihapon monoproteinoituun muotoon bikarbonaattiin, ja edelleen sen deprotonoituun muotoon karbonaattiin (Kuva 8). Veden pH arvon laskiessa hiilidioksidin tasapainoreaktio pyrkii kohti bikarbonaattia, vähentäen näin karbonaattipitoisuutta. Karbonaattipitoisuus on tärkeää monille meren eliöille. (Gallagher, 2023) Koralliriutat ovat merkittävä osa meren ekosysteemiä ja tarjoavat monimuotoisen elinympäristön muille mereneläville. Korallia muodostuu korallieläinten toimesta, jotka muodostavat kuorimaista

korallia ympärilleen nimenomaan karbonaatin avulla. Korallien väheneminen meressä on vain yksi ilmastonmuutoksesta johtuva, meren ekosysteemiin vaikuttava tekijä.

(Tiedonportilla, n.d.)

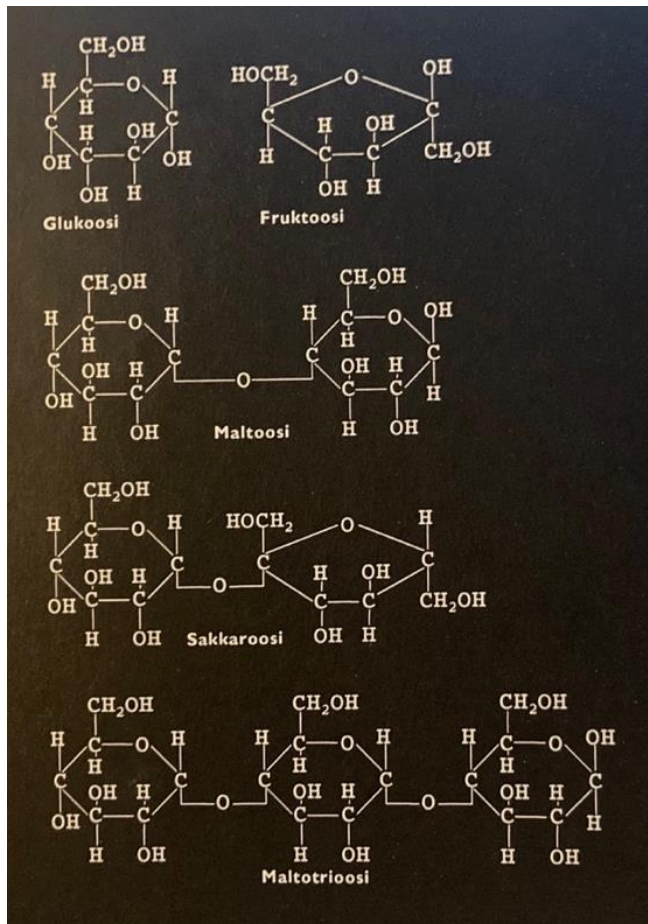
Kuva 8. Hiilidioksidin tasapainorektio (mukaillen Gallagher, 2023).



3.3 Hiilidioksidin muodostuminen panimossa

Vihreät kasvit ovat omavaraisia eliöitä – autotrofeja, jotka syntetisoivat epäorgaanisista hiiliyhdisteistä orgaanisia. Hiilihydraatit eli sokerit, ovat yksi syntyneistä orgaanisista yhdisteistä. Fotosynteesissä syntyvät hiilihydraatit toimivat toisen varaisten eliöiden, eli heterotrofien, energian lähteenä. (Enari & Mäkinen, 2014, s.128) Panimohiiva (*Saccharomyces Cerevisiae*) on yksisoluihin lehtivihreätön, heterotrofisen sieni, jolla on kyky elää sekä aerobisissa, että anaerobisissa oloissa. Hiivan anaerobisen aineenvaihdunnan, fermentaation sivutuotteina syntyy etanolia ja hiilidioksidia. (Sysilä, 1994, s. 74) Panimohiivat jaetaan pohjahiivoihin ja pintahiivoihin, joiden merkittävimpana eroavaisuutena voidaan pitää niiden lämpötilavaatimuksia. Käydäkseen panimohiiva tarvitsee ravinnokseen hiilihydraatteja – käymiskelpoisia sokereita, joita ovat glukoosi, fruktoosi, sakkaroosi, maltoosi, ja maltotriooosi (Kuva 9). Panimossa hiivalle ravintoliuoksena toimii keittämössä valmistuva vierre, joka sisältää myös käymiskelvottomia sokereita, dekstriinejä. (Sysilä, 1994, s. 75)

Kuva 9. Käymiskelpoiset sokerit (mukaillen Sysilä, s. 76).



Oluen tuotannossa kaikki talteen otettavissa olevasta hiilidioksidista syntyy käymisen, anaerobisen aineenvaihdunnan eli fermentaation sivutuotteena. Ennen hapettomissa olosuhteissa tapahtuvaa etanolifermentaatiota on kuitenkin tärkeää järjestää hiivalle hapelliset, aerobiset olosuhteet tehokkaan käymisen ja hiilidioksidin tuoton varmistamiseksi. Hiivan metabolian ansiosta, erilaisten biokemiallisten reaktioiden sivutuotteina syntyy oluelle luonteenomaisia maku- ja flavoriyhdisteitä. Oluen teossa keskitytään eritoten näiden biokemiallisten reaktioiden synnyttämien yhdisteiden luomiseen, ja erilaisten aromi- ja flavoriyhdistelmien generoimisiin kokonaisuuksiin, joiden seurauksena saavutetaan oluelle toivottuja visuaalisia, sekä maku-, haju- ja tuntoaistiakin tyydyttäviä ominaisuuksia. (White, Zainasheff, 2012, s. 11)

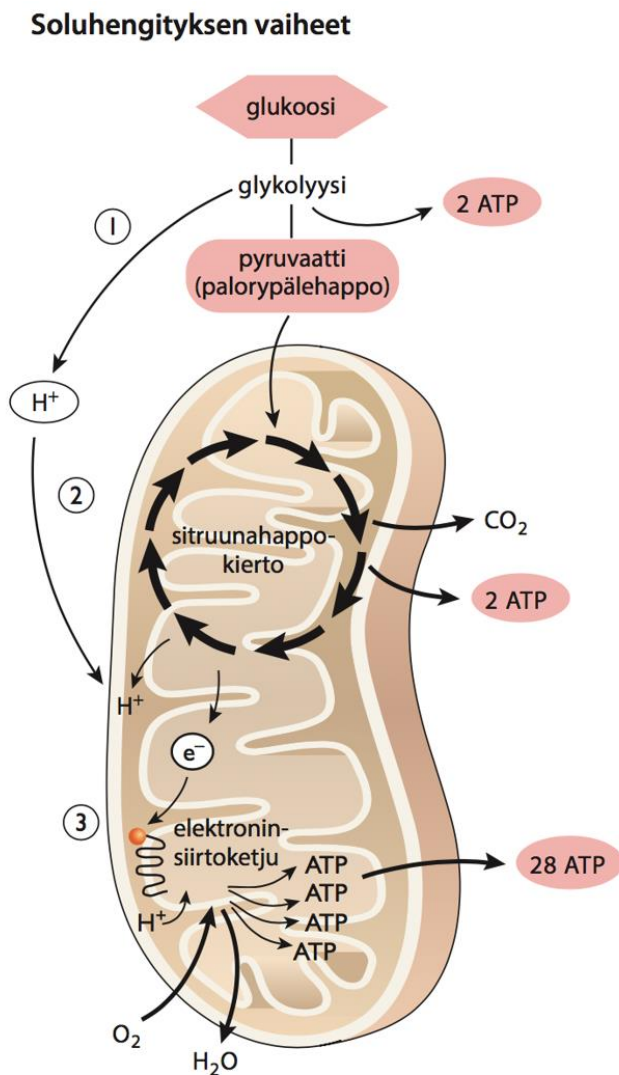
4 Hiivan aerobinen aineenvaihdunta

Hyvän käymisen edellytyksenä on hiivan riittävä hapen saanti ennen anaerobista alkoholikäymistä. Glukoosin hajottaminen hapen läsnäollessa on panimohiivan energian hankintatapa. Soluhengitykseksikin kutsutun tapahtumaketjun päätteeksi syntyy samoja lopputuotteita kuin palamisreaktiossa; hiilidioksidia ja vettä. Soluhengityksessä glukoosin kaikki mahdollinen sidosenergia vapautetaan, ja se hapettuu täydellisesti glykolyysin,

sitruunahapposyklin ja hengitysketjun kautta (Kuva 10). (Enari & Mäkinen, 2014, ss. 128–130) Solun energianhankinta perustuu mahdollisimman monen ATP molekyylin vapauttamiseen. Adenosiinitrifosfaatti ATP:n fosfaattiryhmien väliset sidokset ovat runsas energisiä, eivätkä kovin pysyviä. Tästä syystä ATP toimii anabolisten ja katabolisten reaktioiden energian välittäjänä. Solut kuluttavat anabolisissa reaktioissa ATP:tä hapettaen elektroninsiirtäjäkoentsyymien, kun taas katabolisten reaktioiden tapahtumassa vapautuu ATP:tä. (Solunetti, 2006) Hapen läsnäollessa hiivalla on paljon energiaa käytettävään - se kasvaa, ja lisääntyy (Sysilä, 1994, s. 78). Hyvän etanolikäymisen edellytyksenä on tarpeeksi suuren hiivapopulaation työskentely. Hapen mahdollistaman soluhengityksen ansiosta, sitruunahappokierron tuloksena muodostuu tärkeitä sivutuotteita, kuten steroleita ja rasvahappoja, joita hiivasolu käyttää hyödykseen. (White & Zainasheff, 2012, ss. 66–70) Sterolien syntetisoinnilla on positiivinen vaikutus mm. hiivasolun lipidimembraanin rakenteeseen; pitäen sen kosteana ja optimoiden permeabiliteetin säätöä. (Bonatto, 2022) Membraanin rakenteella on tärkeä rooli fermentaatiossa. Alkoholikäymisen aikana muodostuvat ainesosat saattavat inhiboida hiivan toimintaa merkittävästi, jos sen solumembraani ei ole hyvässä kunnossa. Riittämätön hapen saanti saattaa vaikuttaa negatiivisesti membraanin nestepitoisuuteen ja entsyymitoimintaan. Membraanin kuivuminen ja entsyymitoiminnan häiriöt johtavat vääjäämättä hitaaseen ja epätäydelliseen käymiseen, joka on suoraan yhteydessä oluen makuun ja flavoriin. (White & Zainasheff, 2012, s. 76)

Glukoosi fosforyloituu glykolyysiksi kutsutussa tapahtumassa, jonka aikana glukoosi hajoaa kahdeksi molekyyliksi palorypälehappoa. Glykolyysistä voidaan erottaa 10 eri vaihetta, joissa on saman verran entsyymejä osallisena. Tapahtuman alussa energiarikas ATP luovuttaa - eli fosforyloi - yhden fosfaattinsa sokereille muuttuen adenosiinidifosfaatiksi ADP:ksi. Fosforylaatio vaatii kaksi ATP:tä, mutta glykolyysin lopuksi jokaisesta glukoosimolekyylistä on muodostunut neljä ATP:tä lisää. Glykolyysin nettosaanto on siis kaksi ATP:tä. Nämä kaksi ATP molekyyliä sisältävät glukoosin sidosenergiaa, ja ovat solun käytettävissä energiaa vaativissa synteeseissä. Sitruunahappokierros kutsutussa tapahtumaketjussa glykolyysin toimesta muodostunut puryvaatti liittyy koentsyymi A:han. Muodostunut asetyyli-CoA liittyy oksaalietikkahappoon, jonka seurauksena muodostuu sitruunahappoa. Sitruunahappokierrossa muodostuu vettä, hiilidioksidia ja kaksi ATP:tä lisää. Hiilidioksidia syntyy, kun asteittain hapettava asetyyli dekarboksyloituu. Hapetusreaktioissa hengitysketjuun siirtyvät 8 vetyatomia hapettuvat vedeksi. Tapahtumassa vety ja elektronit siirtyvät hapelle hapetuspelkistysentsyymien, flavoentsyymien ja sytokromien avulla. Elektronien siirtoketjun toiminnan tuloksena saadaan 30 ATP molekyyliä lisää. (Kuva 10) (Enari & Mäkinen, 2014, s. 130)

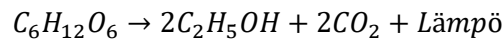
Kuva 10. Soluhengitys (Siikalatvan lukio, n.d.).



5 Hiivan anaerobinen aineenvaihdunta eli käyminen

Anaerobisessa aineenvaihdunnassa – glukoosin pilkkoutuessa etanoliksi ja hiilidioksidiksi, vapautuu moninkertaisesti vähemmän energiaa kuin aerobisissa oloissa. Loppu energia ja jää etanolimolekyylisiin, eikä hiiva kykene enää kasvamaan samaa tahtia kuin hapen läsnä ollessa. Hapen puuttuessa solu ei kykene jatkamaan glykolyysia aktiivisesti hapetusmahdollisuuden puuttuessa, joten solun on turvauduttava toisiin keinoihin. Alkoholikäyminen on hiivalle ominainen tapa hankkia energiaa hapettomissa olosuhteissa. Palorypälehappo dekarboksyloituu, jonka seurauksena syntyy asetaldehydiä, joka pelkistyy etanoliksi. (Enari & Mäkinen, 2014, ss. 132–133) Hiivan biokemiallinen ja fysikaalinen käyttäytyminen määrittää pitkälti käymisen tapahtumaketjun mallin (White & Zainasheff, 2012, ss. 160–161). Etanolikäymisessä syntyy kaksi molekyyliä hiilidioksidia ja kaksi

molekyylillä etanolia jokaista glukoosimolekyylisyksikköä kohden. Reaktio on eksoterminen, jonka seurauksena vapautuu lämpöä:



Glukoosi → *Etanoli* + *Hiilidioksidi* + *Lämpö*

$$100\text{kg} \rightarrow 51,1\text{kg} + 48,9\text{kg} + 34,2\text{kJ}$$

(Broderick, 1977, s. 351)

Oluen pääkäyminen on kestoltaan noin 7–9 vuorokautta ja yksinkertaisimmillaan sen kulku voidaan jakaa eri osiin hiivan käyttäytymisen mukaan:

1. Hiivan kasvatusvaihe – vaihe, kesto niin kauan kuin happea riittää
2. Hiivan lepovaihe – hiiva sopeutuu olosuhteisiin, kesto muutamia tunteja
3. Käymisvaihe alkaa 12–24 h hiivauksesta – lämpötila alkaa nousta
4. Matalan vaahdon vaihe – hiivan toiminta vilkastuu, ja muodostaa vaahtoa vierteen pinnalle
5. Korkean vaahdon vaihe – hiivan toiminta kiihkeimmillään, käyminen nopeinta
6. Peitteen muodostus – hiivan toiminta heikkenee, uutepitoisuus laskee enää hieman
7. Syntynyt nuorolut siirtyy kypsytysvaiheeseen – sekundääriseen käymiseen

(Enari & Mäkinen, 2014, s. 149)

Hiivan laatu ja sen annostelun tasalaatuisuus ovat merkittäviä kriteereitä hyvälle alkoholikäymiselle ja hiilidioksidin tuotolle. Nyrkkisääntönä hiivan annostelulle voidaan pitää:

Hiivan solumäärä = (1 miljoona) × (vierteen määrä, ml) × (vierteen uutepitoisuus, ° Plato)

Tämä ei kuitenkaan ole ainoa totuus, ja panimon prosessiin saattaa sopia paremmin suurempi tai vähäisempi solumäärä. Halutun lopputuotteen saavuttamiseksi, muiden merkittävien käymisolosuhteiden, kuten käymislämpötilan ja vierteen koostumuksen huomioon ottaminen vaikuttaa merkittävästi lopulliseen arvioon tarvittavasta hiivan solumäärästä vierteessä. Huomioon otettavaa on myös hiivan iän tuoma mahdollinen käymistehokkuuden lasku. Kaupallisilla panimoilla on tapana kierrättää hiivaa, jolloin ensikäytössä olevan ja moneen kertaan kierrätetyn hiivan aineenvaihdunnallinen tehokkuus saattaa vaihdella merkittävästikin. Hiivan aineenvaihdunnallinen tehokkuus on suoraan

yhteydessä käymisprosessin tehokkuuteen ja näin ollen myös hiilidioksidin tuottoon.

Yksinkertaisin tapa solumäärän määrittämiseksi on valmistaa paksu vetinen seos hiivasta; hiivaliete. Mikroskoopin avulla hiivalietteestä voidaan laskea hiivasolujen tarkka määrä sen tilavuuden tai massan suhteen. (White & Zainasheff, ss. 121–122)

6 Oluen valmistusprosessi

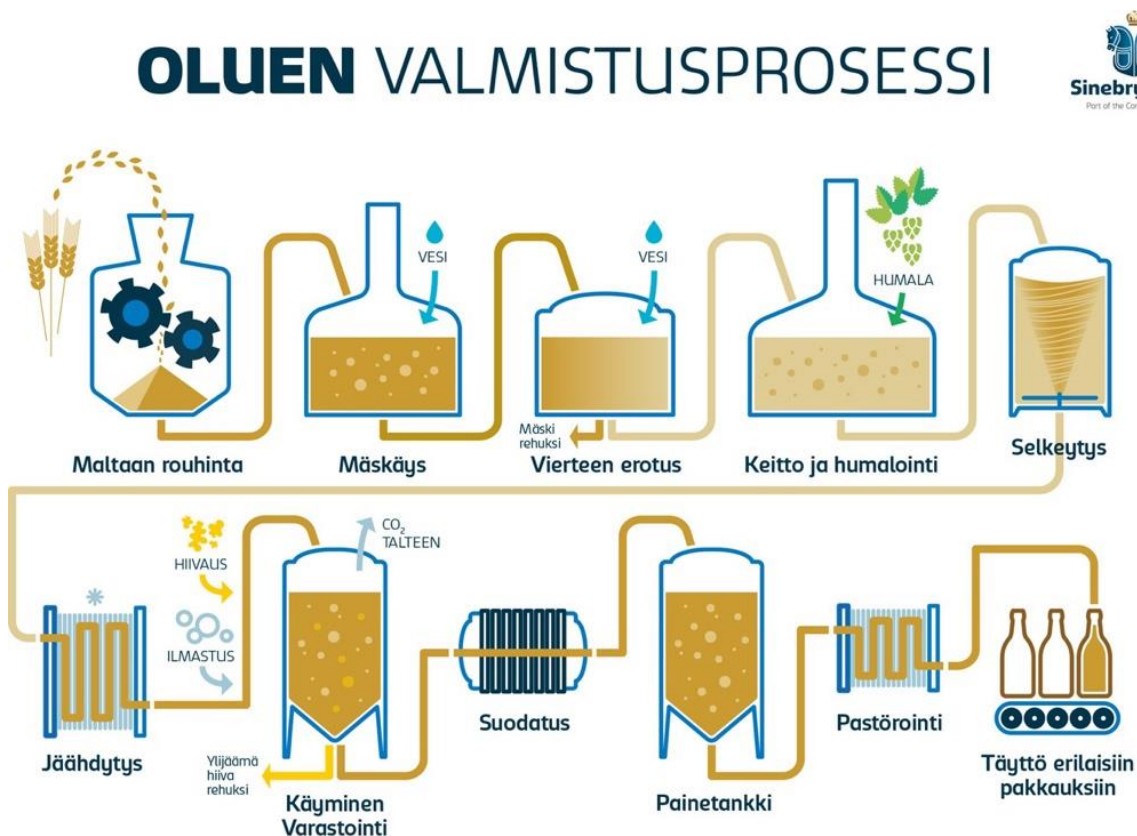
Oluen perusraaka-aineina toimivat vesi, mallas, humala ja hiiva. Pienpanimon oluen tuotantoprosessi voidaan jakaa karkeasti kolmeen eri osastoon: keittämöön, kellariin ja täyttöön, joista jokaisella on merkittävä rooli laadukkaan lopputuotteen päätykselle kaupan hyllylle. Olut valmistuu keittämön ja kellarin yhteistyön tuloksena (Kuva 11). Keittämön tehtävänä on valmistaa mäsäyksen, siivilöinnin, keittämisen, selkeyttämisen ja jäähdytyksen avulla hiivalle mahdollisimman laadukas ravintoliemi; vierre, jonka hiiva käyttää kellarissa valmistukseen olutta. (Enari & Mäkinen, 2014, s. 95) Hyvälle käymisprosessille, ja sen sivutuotteena syntyvälle hiilidioksidin tuotolle, tärkeintä on vierteen sokerikoostumus ja hiivan toiminta. (Enari & Mäkinen, 2014, s. 76) Mäsäyksessä maltaan sisältämät entsyymitoiminnot herätetään henkiin ja ne muuttavat mallasjyvän ravintoaineina toimivat pitkäketjuiset sokerimolekyylit pienemmiksi ja vesiliukoisiksi, käymiskelpoisiksi sokereiksi. Kellarissa hiiva käyttää käymiskelpoiset sokerit muodostaen olueen alkoholia ja hiilidioksidia. (Enari & Mäkinen, 2014, ss. 84–85) Mäsäyksen jälkeisenä osaprosessina toimii siivilöinti, jonka tarkoituksena on erottaa mäsästä nestemäinen vierre (Enari & Mäkinen, 2014, ss. 102–103). Vierrettä keitetään mm. sen entsyymiaktiivisuuden eliminoimiseksi ja veden haihduttamiseksi - halutun sokerikonsentraation saavuttamiseksi vierteeseen (Enari & Mäkinen, 2014, ss.105–106). Keiton jälkeen vierre selkeytetään ja pumpataan lämmönsiirtimen kautta tietyssä lämpötilassa (12–22 °C) panimon kellariin käymistankkiin. Jäähdytyksen aikana vierteen sekaan johdetaan happea, jotta hiivan toiminta saataisiin alkamaan normaalisti. (Enari & Mäkinen, 2014, ss. 110 & 148)

Käymistankissa hiiva reagoi vierteen ja hapen kanssa aloittaen toimintansa ja lisääntymisensä. Kun hiiva kuluttanut kaiken hapen, se alkaa työstämään etanolia ja hiilidioksidia vierteen käymiskelpoisten sokerien avulla. Primäärikäyminen on ohi noin viikossa, jonka jälkeen nuoroluella annetaan aikaa kypsyä. Kypsymisvaiheessa hitaasti toimiva hiivapopulaatio viimeistelee toimintansa, kehittämällä olueen erilaisia flavoriaineita. Käymisestä syntyvää hiilidioksidia käytetään käymistankkien paineistukseen käymisen aikana, jolloin sen ilmakehään päästämistä ”kuristetaan” spundausventtiilin avulla. Käymistankkiin pakotettu hiilidioksidi kerää tankkiin painetta, josta on monia hyötyjä lopputuloksen laadun kannalta - paineen alla hiilidioksidia saadaan imeytettyä paremmin valmiiseen olueen. Käymisen aikana muodostuva hiilidioksidi sisältää haihtuvia yhdisteitä,

aromeja sekä rikkiyhdisteitä, jotka voivat olla epäsuotuisia oluen laadulle. Mm. tästä syystä suurin osa hiilidioksidista johdetaan ulos käymistankista. (Doering, 2020)

Käymisen loputtua valmis olut siirretään mahdollisen suodatuksen kautta painetankkiin, josta se siirretään täyttösaston tölkkilinjalle, tai kegitykseen. Painetankkien paineistukseen, oluen hiilihapottamiseen ja täyttösastolla hapen syrjäyttämiseen käytetään hiilidioksidia (CO₂ Meter, 2016).

Kuva 11. Oluen valmistusprosessi (Sinebrychoff, n.d.).



7 Hiilidioksidin talteenotto

Erilaiset hiilidioksidin talteenotto- ja varastointitekniikat auttavat ilmastotavoitteiden saavuttamisessa. Ne hillitsevät ilmastonmuutosta vähentämällä energiasektorin kasvihuonekaasupäästöjä (Simell, 2023), sekä auttavat hyödyntämään fossiilisia polttoaineita siirtymävaiheessa kohti hiilidioksidineutraaleja tulevaisuuden prosesseja. (Lund, n.d.) Kansainvälisen ilmastopaneelin IPCC:n mukaan, rajoittaaksemme maapallon ilmaston lämpeneminen 1,5 °C asteen tavoitteeseen, on hiilen käyttöä energiantuotannossa vuoteen 2050 mennessä paitsi vähennettävä radikaalisti, niin myös yhdistää käyttöön jäävän hiilen osuus energiantuotannosta hiilidioksidin talteenotolla ja varastoinnilla. Samaan aikaan

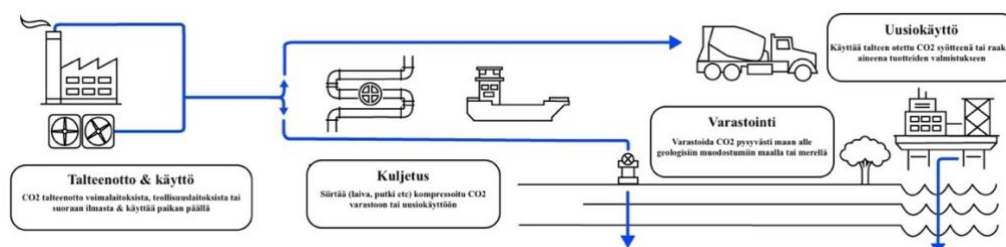
uusiutuvien energiamuotojen osuus energiantuotannossa tulisi olla 52–67 %. (Simell, 2023, ss. 6–7) Jotta hiilidioksidin talteenotosta ja uusiokäytöstä saavutettavat ekologiset hyödyt olisivat mahdollisimman kattavat, on huomioon otettava toteutuksista syntyvät lisäenergiantarpeet ja niiden mahdollisimman ympäristöystävällinen tuotantotapa. Ilmastonmuutoksen hillitsemisen kannalta olisi tärkeää, että talteenoton ja uusiokäytön vaatima lisäenergiantarve tyydytettäisiin erilaisilla uusiutuvien energialähteiden resursseilla. (Ansari ym., 2020, s. 8)

Hiilidioksidin talteenotto on vähähiilisen vedyntuotannon mahdollistaja, joka puolestaan tukee muiden energiasektorien kuten liikenteen hiilidioksidipäästöjen vähentämistä edullisimmin keinoin. Talteenottoa voidaan suorittaa myös suoraan ilmakehästä (IEA, n.d.), sekä bioenergiasta tai biogeenisistä pakokaasuista, jolloin on mahdollista päästä nettonegatiivisiin kasvihuonekaasupäästöihin. Hiilidioksidin talteenotosta käytetään kolmea eri lyhennettä (CCS, CCU, CCUS) talteen otetun hiilidioksidin loppukäytön mukaan. Talteen otettua hiilidioksidia voidaan hyödyntää raaka-aineena erilaisten arvokkaiden hiilipohjaisten tuotteiden valmistuksessa (CCU), varastoida (CCS), tai hyötyä käyttää ja varastoida (CCUS) (Kuva 12), jossa:

- Talteen otettua hiilidioksidia hyödynnetään suoraan paikan päällä
- Talteen otettu hiilidioksidi kompressoidaan ja sitä käytetään raaka-aineena erilaisissa sovelluksissa
- Talteen otettu hiilidioksidi kuljetetaan varastoitavaksi geologisiin muodostumiin kuten ehtyneisiin kaasu ja öljy esiintymiin, sekä suolaisiin pohjavesikerrostumiin

(Lund, n.d.)

Kuva 12. Hiilidioksidin talteenotto, varastointi ja käyttö – CCUS (mukailen IEA, n.d.).



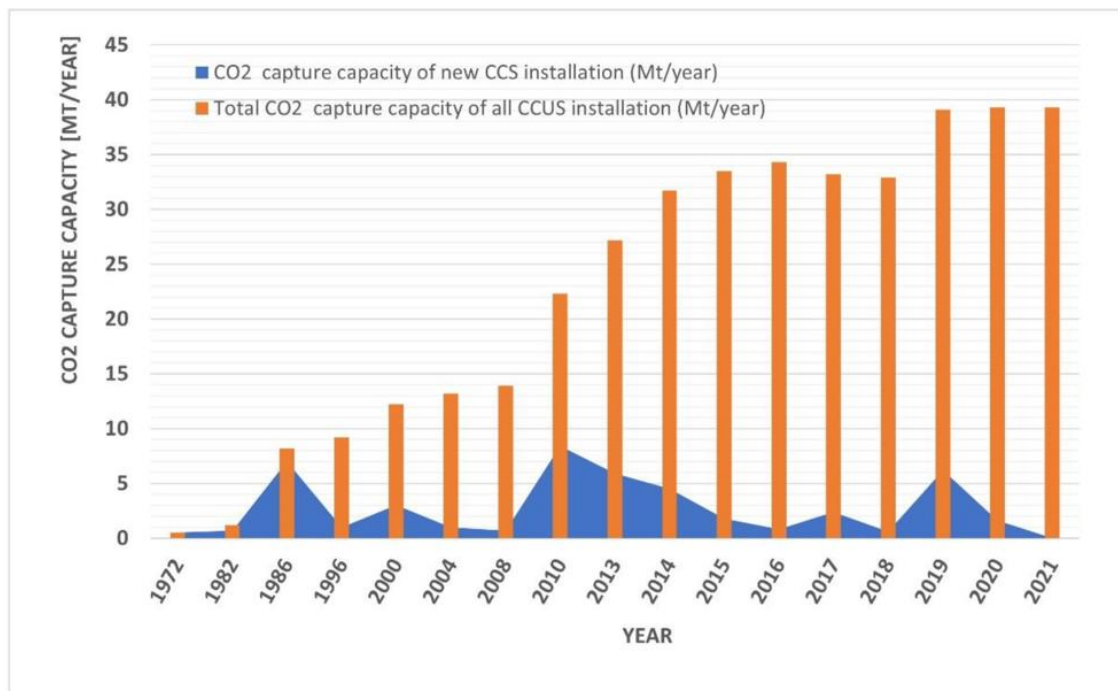
Maailmalla on 27 toiminnassa olevaa CCUS yksikköä, joiden yhteen laskettu talteenottokapasiteetti on 40 miljoonan tonnia vuodessa. Vuodesta 2017 lähtien uusien integroitujen CCUS yksiköiden määrä on nopeassa kasvussa. Vuonna 2021 97 CCUS hanketta oli alkuvaiheessa, 66 edistyneessä vaiheessa, ja 5 rakenteilla. Jos kaikki hankkeet

toteutuvat, voi globaali hiilidioksidin talteenottokapasiteetti kasvaa yli kolminkertaiseksi; noin 130–150 miljoonaan tonniin vuodessa (Kuva 13). Kaikkien CCUS asennusten talteenottokapasiteetti vuodesta 1972 vuoteen 2021 on noussut merkittävästi. (Kuva 14). (Chmiel ym., 2022) Puhuttaessa hiilidioksidin talteenotosta - selkeyden vuoksi tässä työssä viitataan sen hyödyntämisen ja varastoinnin yhdistävään lyhenteeseen CCUS, jos toisin ei mainita.

Kuva 13. Toiminnassa ja kehitysvaiheessa olevat ja CCS - laitokset (mukailien Chmiel ym., 2022).



Kuva 14. CCUS - laitokset: kokonaiskapasiteetti ja uusien laitosten kapasiteetti vuosina 1972 (mukaillen, Chmiel ym., 2022).



7.1 CCS – Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi

Vielä kehitysvaiheessa olevaa Carbon Capture and Storage -teknologiaa (CCS) kehitellään globaalisti jatkuvasti (Aatos ym., 2011, S. 26). Se viittaa sovelluksiin, joissa talteen otettu hiilidioksidi joko kuljetetaan varastoitavaksi geologisiin muodostumiin kuten ehtyneisiin kaasu ja öljy esiintymiin sekä suolaisiin pohjavesikerrostumiin (IEA, n.d.), tai sidotaan joko biomassaan tai kiinteiksi mineraaleiksi kemiallisia rektioita hyödyntäen. (Ilmasto-opas, n.d.-b) Teknologiaan liittyy kuitenkin huolia, ja sen toteuttamiskelpoisuutta ja pitkän aikavälin seurauksia on kyseenalaistettu. CCS:n käyttöönotto ja ylläpito ei ole kustannustehokasta, varastointipaikat ovat rajallisia sekä ympäristöriskit mahdollisten vuotojen sattuessa korkeat. Globaalille öljyinsinöörien yhdistykselle, SPE:lle pitämässään esitetystä energia asiantuntija Michael Economides arvioi Kioton sopimuksen mukaisten hiilidioksidipäästöleikkausten vaativan vuoteen 2030 mennessä määrällisesti 161 429 maanalaista hiilidioksidivarastoa, kustannusten noustessa 1,61 biljoonaan Yhdysvaltain dollariin. (Ansari ym., 2020, s. 1)

7.2 CCU – Hiilidioksidin talteenotto ja hyödyntäminen

Carbon Capture and Utilization (CCU) viittaa sovelluksiin, joiden avulla talteen otettua hiilidioksidia hyödynnetään joko suoraan (ei kemiallista käsittelyä), tai raaka-aineen

ominaisuudessa – muunneltuna erilaisiksi tuotteiksi. Hiilidioksidia otetaan talteen käyttäen CCU sovelluksia globaalisti vuosittain noin 230 Mt, josta noin 130 Mt käytetään urean valmistukseen käyttäen suoraan hyväksi lannoiteteollisuudesta talteen otettua hiilidioksidia. Uusia CCU sovelluksen hyödyntämiskohteita kuten mm. synteettisiä polttoaineita, kemikaaleja ja rakennusmateriaaleja kehitellään jatkuvasti lisää. Tavoitteena on hyödyntää hiilidioksidia uusiin kohteisiin 10 Mt vuosimäärällä vuoteen 2030 mennessä. (IEA, n.d.)

8 Hiilidioksidin talteenottotekniikat

Erilaisten talteenottotekniikoiden avulla prosesseissa syntyvä hiilidioksidi otetaan talteen ennen sen vapautumista ilmakehään poistokaasujen mukana. 10–15 % hiilidioksidia sisältävä poistokaasu on jälkikäsiteltävä ja väkevöitävä, jonka takia talteenottoa pidetään yleisesti ottaen mahdollisena ja kannattavana vain suurten päästölähteiden, kuten energiatuotantolaitosten ja suuren mittakaavan teollisten tuotantolaitosten prosesseille. Tekniikoita on kolmenlaisia, ja ne jaotellaan hiilidioksidin talteenottoajankohdan mukaan:

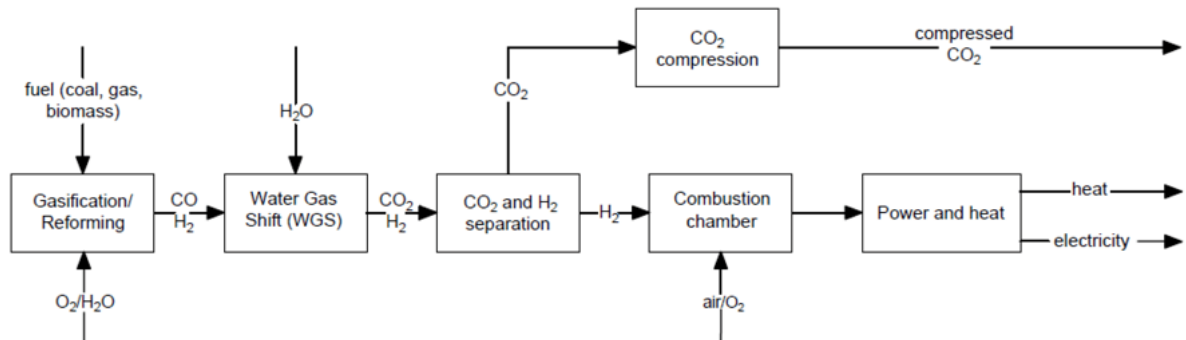
- a) Ennen polttoa tapahtuva talteenotto (post - combustion)
- b) Polton jälkeen tapahtuva talteenotto (pre - combustion)
- c) Happipoltto talteenotto (oxy - fuel)

(Ilmasto-opas, n.d.-b)

8.1 Ennen polttoa tapahtuva talteenotto (post - combustion)

Enne polttoa tapahtuvassa talteenotossa hiilidioksidi erotetaan kaasumaiseen muotoon muutetusta kiinteästä polttoaineesta (Kuva 15). Synteettisten polttoaineiden polton yhteydessä tapahtuvassa ratkaisussa hapen, lämmön ja paineen avulla prosessin sivutuotteena syntyy 25–40 % hiilidioksidia. Tekniikassa käytetään samaa talteenottoprosessia kuin polton jälkeen tapahtuvassa menetelmässä, jossa hiilidioksidi sidotaan liuokseen pesurin avulla, korkeamman hiilidioksidipitoisuuden salliessa pienemmän ja kustannustehokkaamman laitteiston. (Ilmasto-opas, n.d.-b)

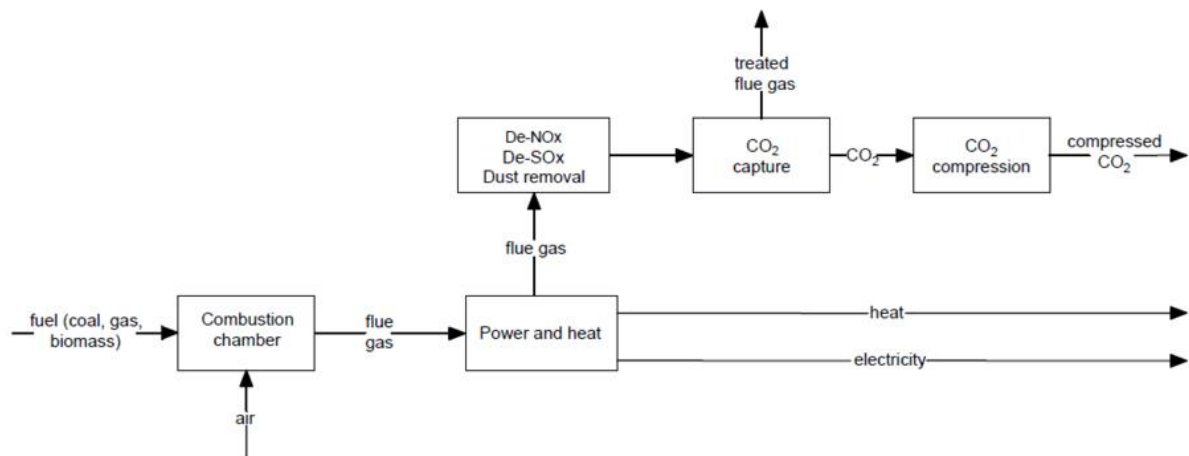
Kuva 15. Sähkön- ja lämmöntuotannon lohkokkaavio, jossa käytetään ennen polttoa tapahtuvaa hiilidioksidin talteenottomenetelmää (mukaiillen Chmiel ym., 2022).



8.2 Polton jälkeen tapahtuva talteenotto (pre - combustion)

Muun muassa maakaasun puhdistamiseen maakaasuteollisuudessa käytetty, polton jälkeen tapahtuva talteenotto menetelmä (Kuva 16) perustuu hiilidioksidin talteenottoon pesurin avulla, jossa CO₂ poistetaan piippuun menevästä savukaasusta polton jälkeen sitomalla se liuokseen. Liuoksena voi toimia mm. kuumennettu Monoetanolamiini, jonka avulla hiilidioksidi vapautuu savukaasusta. (Ilmasto-opas, n.d.-b)

Kuva 16. Sähkön- ja lämmöntuotannon lohkokkaavio, jossa käytetään polton jälkeen tapahtuvaa hiilidioksidin talteenottomenetelmää (mukaiillen Chmiel ym., 2022).

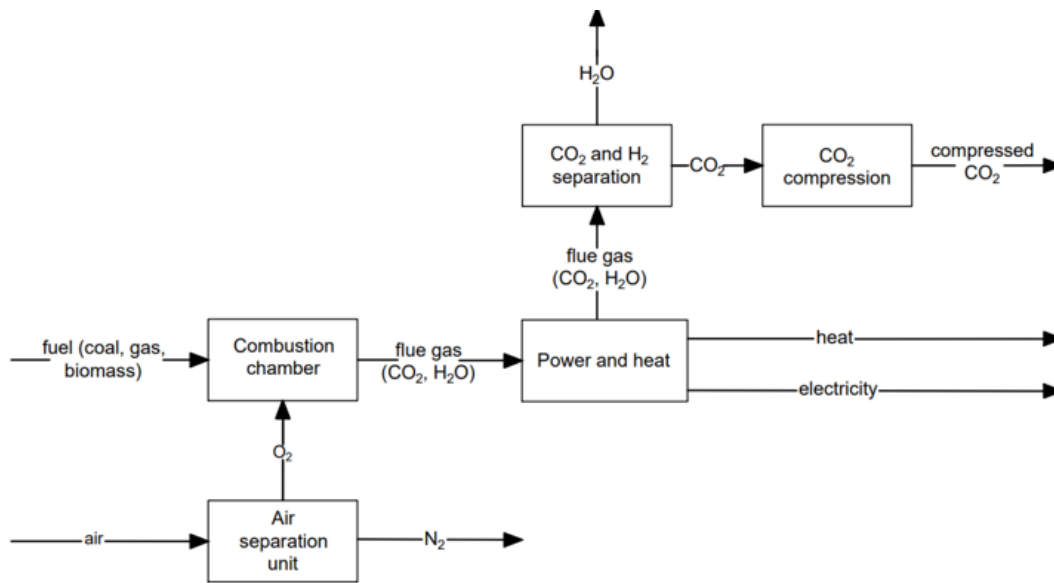


8.3 Happipoltto talteenotto (oxy - fuel)

Happipolttua hyväksikäyttävässä menetelmässä saavutetaan hiilidioksidipitoisuudeltaan jopa yli 80 % savukaasu. Puhtaan hapen avulla kattilassa tai turbiinissa tapahtuva polttoaineen poltto mahdollistaa ennen polttoa tapahtuvaa talteenottoakin vähäisemmät vaatimukset

savukaasun käsittelylle (Kuva 17). Puhtaan hapen valmistaminen kuitenkin kompensoi savukaasujen käsittelyprosessissa säästettyjä kustannuksia. Kansainvälisen ilmastopaneelin IPCC:n mukaan menetelmä on vasta kehitysvaiheessa, eikä se ole siksi yleisesti käytössä. (Ilmasto-opas, n.d.-b)

Kuva 17. Sähkön- ja lämmöntuotannon lohkokaavio, jossa käytetään happipolttoa hiilidioksidin talteenottomenetelmänä (mukaillen Chmiel ym., 2022).



9 Hiilidioksidin talteenotto panimoteollisuudessa

Jokainen panimo – koosta riippumatta – käyttää hiilidioksidia tuotantoprosessissaan ja tuottaa sitä käymisprosessinsa sivutuotteena. Hiilidioksidin talteenottoa ei kuitenkaan voi toteuttaa yksinkertaisesti – johtamalla prosessissa syntyvä kaasu suoraan varastosäiliöön. Tämä johtuu osaltaan siitä, että yhden puristamattoman hiilidioksidikilogramman tilavuus on noin yksi litra. Ottaen huomioon panimolla käytetyn hiilidioksidimäärän yleisen keskiarvon (noin 1,5–8,1 kg/hl olutta), kasvaisi suora talteenottomenetelmää käyttäessä tarvittavan varastosäiliön koko valtavaksi. Toisekseen käymisen tuloksena syntyvä hiilidioksidi sisältää kosteuden ja hapen lisäksi muitakin ei-toivottuja ainesosia, kuten aromaattisia yhdisteitä, asetaldehydia, rikkidioksidia, metanolia ja typpioksidia, eikä siksi ole käyttökelpoista sellaisenaan - em. yhdisteiden kulkeutuminen oluentekoprosessiin johtaisivat väistämättä lopputuotteen merkittäviin flavoripoikkeamiin, laatuongelmiin ja pilaantumisriskin nousuun. Näin ollen, ennen kuin talteen otettava hiilidioksidi on elintarvikekäyttöön sopeutuvaa, se tulee puhdistaa ja kuivata. Jotta talteen otettavan hiilidioksidin tilantarve ei kasvaisi turhan suureksi, on kaasu kompressoitava ja varastoitava nestefaasissa. (Dornbusch, 2023)

Isoille panimoille oman hiilidioksidin talteenottolaitteiston käyttöönotto on ollut taloudellisesti kannattavaa jo vuosikymmenten ajan (Dornbusch, 2023). Samaan aikaan pienen mittakaavan panimotoiminnassa hiilidioksidin ostaminen on ollut yksinkertaisin, tehokkain ja kannattavin tapa hiilidioksidin hankkimiselle. Kun panimon tuotantovolyymi kasvaa, kasvaa myös ostettavan hiilidioksidin tarpeen määrä. Viime vuosien toimitus- & laatuongelmat sekä markkinahinnan jyrkkä nousu ovat johtaneet yleisesti kasvavaan kiinnostukseen hiilidioksidin talteenottolaitteistoja kohtaan pienten panimoiden osalta (First Key, n.d.). Kun kiinnostusta talteenottolaitteistoja kohtaan on nyt myös pienemmässä mittakaavassa, ovat valmistajat ryhtyneet kehittämään tekniikkaa vastatakseen tähän kysyntään (Dornbusch, 2023).

10 Pienpanimon hiilidioksidin talteenottotekniikka

Koosta riippumatta, panimoille suunnattujen eri talteenottolaitteistojen toimintaperiaate on hyvin samankaltainen. Erot eri laitteistojen välillä rajoittuvat pääosin kompressorien toiminnan eroavaisuuksiin ja mahdollisen välivaraston; kaasupallon käyttöön. Vuosituotantovolyymiltään 7 500 000 litran kokoisten panimoiden hiilidioksidin talteenottolaitteistoksi on pääasiassa kaksi vaihtoehtoa:

- a) Erillisellä hiilidioksidin välivarastolla (kaasupallo) varustettu laitteisto, jolloin talteenottolaitteiston pääkompressorit toimivat itsenäisenä yksikkönään.
- b) Erillisten korkeapainekompressorien avulla hiilidioksidi johdetaan suoraan nestemäisen hiilidioksidin varastosäiliöön.

Korkeapainekompressoreita käytettäessä, pääkompressorit saattavat joutua työskentelemään osittain vajaakäynnillä, jolloin niiden toiminta on tehotonta. Tämä on syytä pitää mielessä eri laitteistoja tarkasteltaessa. Panimolle sopivan laitteiston tulee olla kooltaan ja tehokkuudeltaan kannattava, ja näitä aspekteja tulisi aina harkita panimokohtaisesti.

Kaasupallolla varustettu hiilidioksidin talteenottolaitteisto panimolle (Kuva 18) koostuu seuraavista elementeistä:

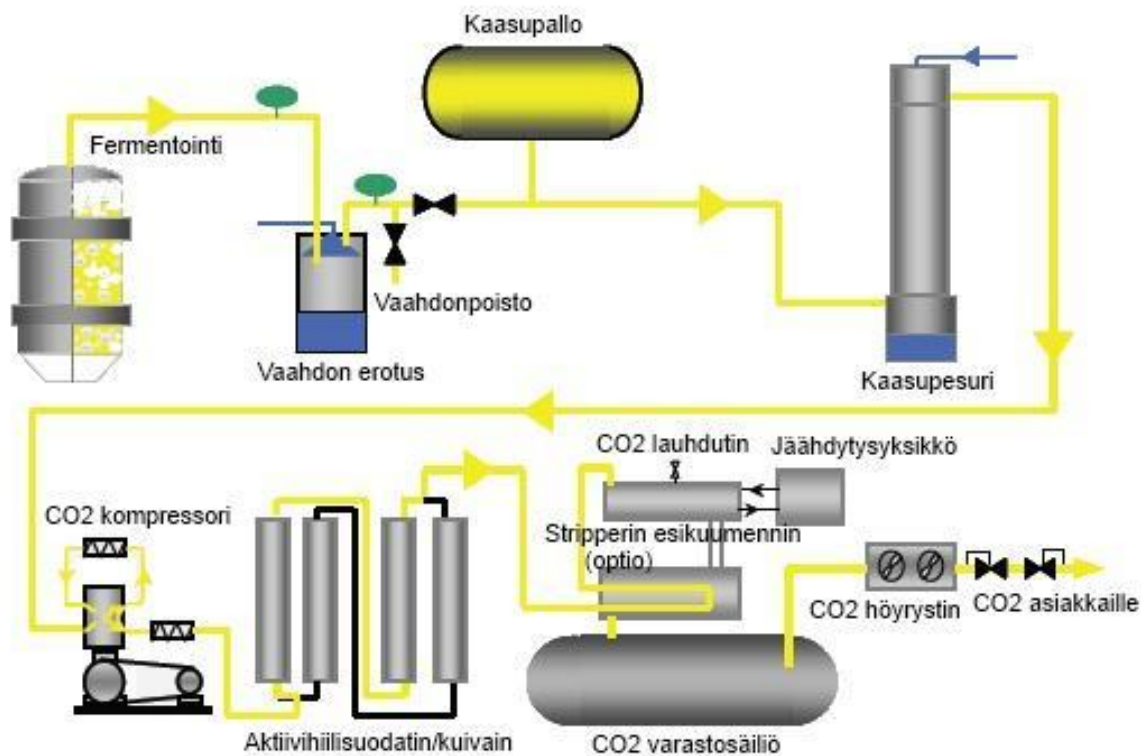
- foam Trap – vaahdonerotin
- kaasupallo
- märkäpesuri
- kompressori lämmönvaihtimella
- aktiivihiihisuodatin ja kuivain
- kondensaattori / lauhdutin
- nestestripperi – kolonni ja lämmönvaihdin

- nestemäisen hiilidioksidin varastosäiliö
- CO2 höyrystin

(First Key, n.d.)

Kuva 18. Hiilidioksidin talteenotto (Sintrol, 2023).

TALTEENOTTOPROSESSI



10.1 Talteenottolaitteisto kaasupallolla

Käymistankista talteen otetun hiilidioksidin ensimmäinen Vaahdonerotin voi olla joko pysty- tai vaaka-asennossa oleva säiliö, jonka toiminta perustuu suihkuavan veden kykyyn hajottaa vaahtoa. Korkeapainekompressori puristaa / paineistaa käymistankeilta virtaavan kaasun ja syöttää sen pääkompressoreille. Tämä mahdollistaa pienemmän talteenottoputkiston käytön, mutta seurauksena voi olla pääkompressorien tehokkuuden lasku hiilidioksidin virtauksen vaihtelun seurauksena. Tuotantovolyymin kasvaessa on yleisempää välivarastoida normaalipaineinen hiilidioksidi ennen varsinaista kompressointia ja putsausta kaasupalloon. Tämä mahdollistaa pääkompressorien tehokkaamman käytön. Virtaus välivarastosta on tasaista, eikä kompressorien tarvitse olla päällä vajaakäynnillä. Välivaraston käyttö mahdollistaa myös hiilidioksidin tasapainottelun varsinaisen nestemäisen varaston ja välivaraston välillä. Hiilidioksidin talteenotto ei häiriinny mahdollisten välivaraston jälkeisten

prosessien huoltoseisakkien toimesta. Väliavarastoratkaisun haittana voidaan pitää sen tuomaa lisätilantarvetta panimon alueella. (First Key, n.d.)

Ennen kompressointia hiilidioksidi johdetaan märkäpesuriin, jossa kaasusta poistetaan vesiliukoiset epäpuhtaudet kuten etanoli ja aerosolit, jotka epävakauttavat pääkompressorin toimintaa. Kaksi vaiheisen pääkompressorin tehtävänä on muuttaa normaalipaineinen hiilidioksidi noin 15 Barin paineeseen, ja poistaa kaasusta kosteus. Kompressoitu kaasu johdetaan puhdistavan aktiivihiihisuodattimen läpi, ja kuumalla ilmalla kosteutta poistavan kuivaimen läpi. Puhdistettu ja kuivattu korkeapainehiilidioksidi johdetaan lämmönvaihtimen läpi, joka tiivistää kaasun nestemäiseksi. Kaasupesurin toimintaperiaate perustuu nesteessä olevien epäpuhtauksien poistoon kaasun avulla. Kaasupesurin lisääminen prosessiin takaa puhtaamman lopputuotteen ja mahdollistaa aikaisemman hiilidioksidin talteenoton aloituksen. Ilman kaasupesuria, käymisen alkuvaiheessa syntyvän hiilidioksidin happipitoisuutta on pidettävä tarkemmin silmällä. Kaasupesurin avulla, voidaan hiilidioksidin talteenotto aloittaa n. 8tuntia aiemmin kuin ilman sitä, jolloin talteenotto on hyvä aloittaa n. 24 tuntia käymisen aloituksesta, jotta happipitoisuus ei olisi lopputuotteessa liian suuri. Kaasupesurin avulla päästään hiilidioksidin 99.998 % puhtauteen, joka sisältää happea < 5 ppm. (First Key, n.d.)

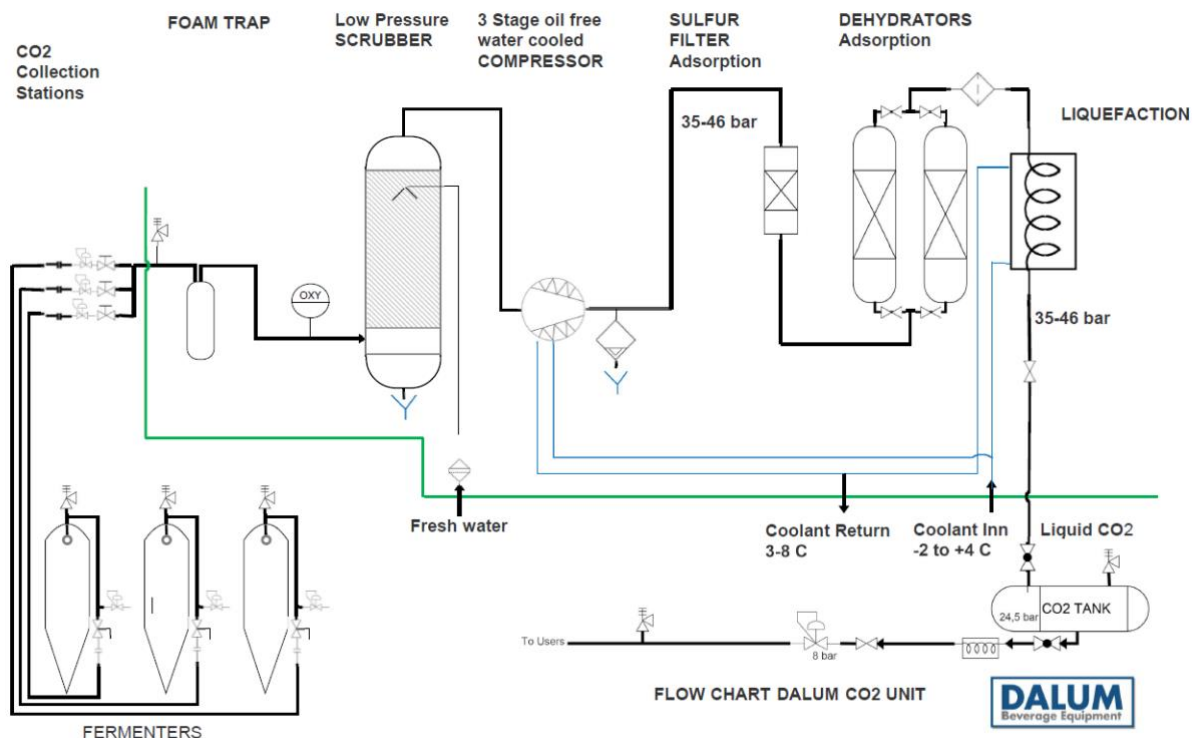
Hiilidioksidi on 1,5 kertaa ilmaa painavampaa ja hajutonta, joten varastosäiliön mahdollisen vuodon aiheuttamat riskit on hyvä minimoida sijoittamalla varastosäiliö ulkotiloihin turvallisuussyistä. Höyrystimen toimintaperiaate perustuu nestemäisen hiilidioksidin muuttamiseen kaasuksi, joko sähkövastuksen tai höyryn avulla. (First Key, n.d.)

10.2 Talteenottolaitteisto korkeapainekompressorilla

Korkeapainekompressoreilla varustetun talteenottolaitteiston etuna on sen koko. Tanskalainen Dalum Beverage Engineering on rakentanut kompaktin ja tehokkaan talteenottolaitteiston, joka käyttää hyväkseen varta vasten kehitettyä kolmivaihekompressorisysteemiä (Kuva 19). Yksittäisen laitteen koko on 1 m x 1 m x 3 m (Kuva 20). Hiilidioksidikaasun happipitoisuutta monitoroidaan vaahdonerottimen jälkeen, jonka ansiosta talteenotto aloitetaan vasta happipitoisuuden laskiessa alle 0,6 %. Kaasu johdetaan 3 metriä korkeaan märkäpesurikolonnein, joka on täynnä pallorengassekoittimia. Kolonnin ylärajasta suihkutettava kylmä vesi absorboi ylöspäin kulkevan kaasun epäpuhtauksia; estereitä ja alkoholeja. Puhdistettu kaasu johdetaan kiinteän aineen suodattimen läpi 3 - vaiheiseen kompressorin. Dalumin suunnittelema öljytön, dynaamisella tehokkuudella / nopeudella varustellussa kompressorissa kaasu puristetaan vaiheittain 35–45 Barin paineeseen monisynterisessä männässä. Vaiheiden 2 ja 3 välillä kaasu kulkee korkeapaineisen rikkipesurin läpi. Hiilidioksidi johdetaan korkeapaineisena inerttiä

alumiinioksidia sisältävän kuivaimen kautta jäähdytykseen. Kaasun kuivuuksastetta voidaan kuvailla kastepisteen avulla: mitä alhaisempi kastepiste, sitä kuivempaa kaasu on. Kuivaimen jälkeen hiilidioksidikaasun kastepiste on $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. 35 Barin paineessa oleva kuiva hiilidioksidikaasu jäähdytetään $3\text{--}4\text{ }^{\circ}\text{C}$ nesteytyäkseen ja johdetaan varastosäiliöön. (Gadd, 2022)

Kuva 19. Dalum talteenottolaitteisto (mukailen Dalum, 2023).



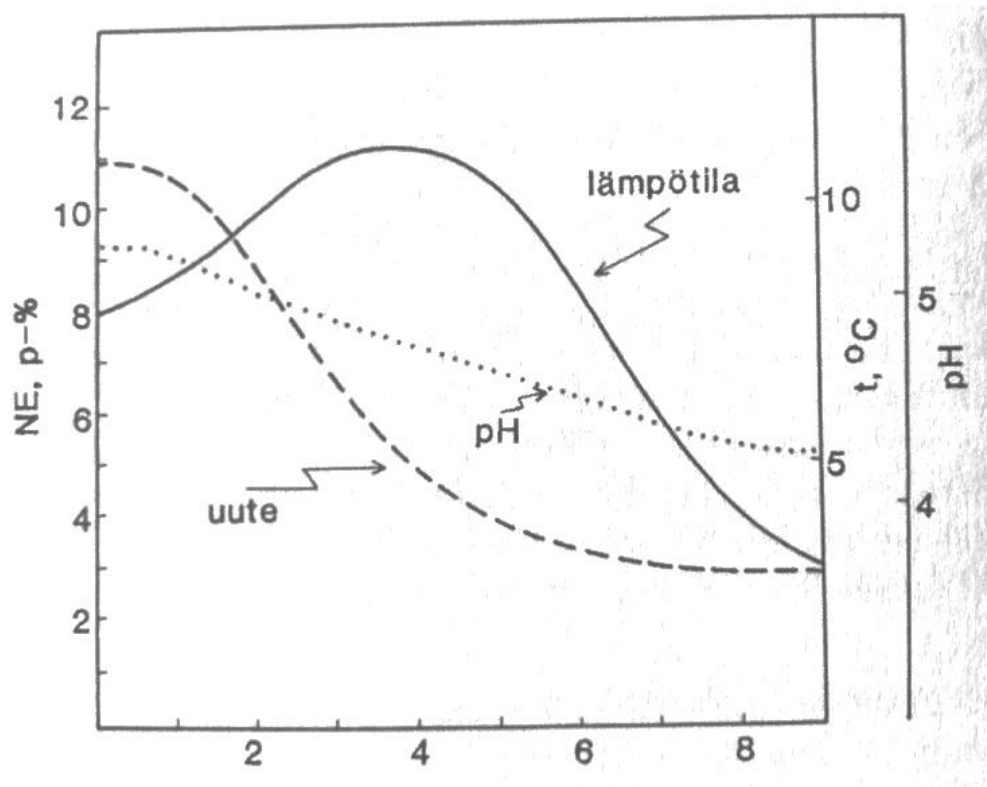
Kuva 20. Dalum laitteiston kompakti koko (mukaillen Dalum, 2023).



11 Panimon hiilidioksidin tuoton arvioiminen

Potentiaalinen käymisessä syntynyt hiilidioksidimäärä voidaan laskea, kun käymisen aikana mitataan ja seurataan vierteen uutemäärää. Kun käymisen alun uutepitoisuudesta vähennetään käymisen lopun uutepitoisuus, saadaan tietoon käymisessä kulunut uutemäärä. Tästä määrästä voidaan laskea teoreettinen hiilidioksidin määrä. (Broderick, 1977, s. 351) Käymisprosessissa vierteen uutepitoisuuden seuranta on normaali päivittäinen toimenpide, jonka avulla seurataan vierteen käymisen kulkua. Käymisessä vierteen ominaispaine laskee, kun hiiva muuttaa käymiskelpoisia sokerimolekyylejä alkoholiksi. Lasku johtuu raskaan sokerin muuttuessa vettä kevyemmäksi alkoholiksi, ja hiilidioksidiksi. Ominaispainon lasku pysähtyy, kun kaikki käymiskelpoiset sokerit ovat muuttuneet alkoholiksi ja hiilidioksidiksi. (Sysilä, 1994, s. 71) Yleisesti ottaen hiilidioksidin talteenotto voidaan aloittaa 24 h käymisen alkamisesta, riippuen käymisnopeudesta. Arvioidaan esimerkkitapauksen seurannasta (Kuva 21) vierteen uutepitoisuuden määräksi 10,6 °P 24 h käymisen alkamisesta. Käymisen lopussa, uutepitoisuuden laskiessa hitaasti, hiilidioksidin muodostuminen on turhan hidasta talteenoton tehokkuuden kannalta. Keskimääräinen talteenottoaika on yleensä n. 3–5 vuorokautta, jolloin käyminen on voimakkainta. (Broderick, 1977, s. 352) Arvioidaan esimerkkitapauksen uutepitoisuudeksi 4,4 °P talteenoton lopussa.

Kuva 21. Käymisen seuranta (Enari & Mäkinen, 2014, s. 150).



Potentiaalinen talteen otettava hiilidioksidimäärä voidaan laskea tarkemmin, kun käyneen sokerimäärän kertoimena käytetään lukua 0,40. Teoreettisesti jokaista sokerigrammaa kohti syntyy 0,489 g hiilidioksidia, mutta kertoimena käytettävä luku 0,40 ottaa huomioon hiilidioksidin liukenemisen nesteeseen sekä syntyvän alkoholin keveydestä muodostuvan tiheysvääristymän. (Broderick, 1977, s. 352) Näin talteen otettavan hiilidioksidimäärän laskemiseen saadaan laskusääntö, johon käytetään esimerkkitapauksen (Kuva 21) uutekäyrän lukuja / hl vierrettä / 3,5 päivää. 3,5 päivää siksi, koska 4,5 päivän kohdalla voidaan sanoa uudemäärään laskun hidastuvan. Laskusääntöä hyväksi käyttäen esimerkkitapauksen talteen otettavan hiilidioksidin määrä on 2,48 kg / hl vierrettä:

$$\text{Uutemäärä, talteenoton alku } ^\circ\text{P} = 10,6 = 10,6 \text{ kg}$$

$$\text{Uutemäärä, talteenoton loppu } ^\circ\text{P} = 4,4 = 4,4 \text{ kg}$$

$$\text{Talteenoton aikana kulunut uute} = 10,6 \text{ kg} - 4,4 \text{ kg} = 6,2 \text{ kg}$$

$$\text{Talteenotettu hiilidioksidi per hl vierrettä} = 6,2 \text{ kg} \times 0,40 = 2,48 \text{ kg}$$

(Broderick, 1977, s. 352)

12 Tulokset

Nokian Panimon kestävä tuotannon näkökulmasta hiilidioksidin talteenottolaitteiston käyttöönotto on perusteltua. Ilmastonmuutoksen hidastaminen kasvihuonekaasupäästöjä vähentämällä on konkreettinen ja tärkeä toimenpide kohti kestävämpää tulevaisuutta ja maapallon hyvinvointia. Panimoteollisuudessa käytettävää Hiilidioksidia valmistetaan muun – fossiilisia polttoaineita käyttävän – teollisuuden sivutuotteista. Hiilidioksidin talteenottolaitteiston käyttöönotto kehittäisi Nokian Panimon tuotannon kestävyyttä. Se vähentäisi merkittävästi panimon hiilidioksidin ostotarvetta, yrityksen hiilidioksidijalanjälkeä ja riippuvuussuhdetta fossiililla polttoaineilla tuotetun hiilidioksidin markkinoihin. Maakaasun hinta ja saatavuus korreloivat suoraan hiilidioksidin markkinahintaan, jonka odotetaan jatkavan nousemistaan. Talteen otettavan hiilidioksidin taloudellinen merkittävyys vain kasvaa tulevaisuudessa.

Lasketaan Nokian Panimon oletettuja tuotantolukuja ja kirjallisuudesta löytyvää teoriaa hyväksikäyttäen panimon talteen otettavan hiilidioksidin teoreettinen määrä vuodessa. Saatavaa lukua voidaan käyttää hyväksi:

- a) Laskettaessa tarvittavan nestemäisen hiilidioksidivaraston kokoa
- b) Määriteltäessä hiilidioksidin ostotarpeen vähenemisen tuomia kustannussäästöjä

12.1 Talteen otettavan hiilidioksidimäärän teoreettinen laskeminen

Nokian Panimon käymisprosessin seurantaraporteista voidaan nähdä panimon tyyppillisen käymisen tapahtumat. Käymisraportti pitää sisällään panimolle tärkeitä, salassa pidettäviä tietoja, joten sitä ei tässä työssä esitellä tarkemmin. Kirjallisuudesta löytyvä kehoitus vuorokauden odottamiselle ennen hiilidioksidin talteenoton aloitusta tarkoittaisi panimolla sitä, että vierteen uutepitoisuus olisi jo turhan alhainen. Toisaalta kirjallisuudesta yleiseksi ohjenuoraksi löydetty talteenoton kokonaiskesto: 3,5 vuorokautta tarkoittaisi käymisen olevan jo lähes loppunut. Arvioidaan talteenoton aloitus ajankohtaa kirjallisuuskatsauksesta poiketen aikaisemmiksi, ja talteenoton kokonaiskestoksi 3 päivää. Käytetään talteenoton aloitus ajankohtana 12 h käymisen alkamisesta, jolloin vierteen arvioitu uutepitoisuus on 10,0 °P, ja talteenoton lopussa 2,5 °P. Nokian Panimolla tehdään eniten tarkastellun käymisraportin mukaista Lager olutta. Vaikka tuotannossa on myös vahvempia ja miedompia oluita, voidaan kyseisen Lagerin käymisraportin uutemääriä pitää keskiarvona koko vuoden tuotannolle. Näin voidaan laskea hypoteettinen arvio koko vuoden 2022 tuotannosta talteen otettavasta hiilidioksidimäärästä – esimerkkiraportin mukaan. Kirjallisuudesta löydetyn esimerkitapauksen (Kuva 21) mukaisesti, käytetään Nokian Panimon esimerkissä käyneen

sokerimäärän kertoimena myös lukua 0,40 – potentiaalisen talteen otettavan hiilidioksidimäärän laskemisessa. Nokian Panimon vuotuinen oluentuotantomäärä on salaista tietoa, eikä sitä käytetä tässä työssä. Suomessa pienpanimon suurin sallittu oluen tuotantovolyymi on 15 000 000 litraa (Verohallinto, 2019). Nokian Panimoa voidaan kutsua suomen mittakaavassa keskisuureksi pienpanimoksi, joten tässä työssä käytetty tuotantomäärä keskisuurelle pienpanimolle arvioidaan olevan 50 % suurimmasta sallitusta tuotantovolyymistä, eli 7 500 000 litraa.

Laskennassa käytettäviä, oletettuja tuotantolukuja vuodelle 2022 ovat:

- Kokonaistuotanto 7 500 000 litraa olutta
- Keskiarvoinen uutemäärä hiilidioksidin talteenoton alussa: 10,0 °P
- Keskiarvoinen uutemäärä hiilidioksidin talteenoton lopussa: 2,5 °P

Lasketaan talteen otettavan hiilidioksidin määrä / hl vierrettä, sekä vuotuinen hiilidioksidin talteenottomäärä:

$$\text{Talteenoton aikana kulunut uute} = 10,0 \text{ kg} - 2,5 \text{ kg} = 7,5 \text{ kg}$$

$$\text{Talteenotettu hiilidioksidi per hl vierrettä} = 7,5 \text{ kg} \times 0,40 = 3 \text{ kg}$$

$$\text{Vuotuinen oluen tuotanto (hl)} = 7\,500\,000 \text{ l} = 75\,000 \text{ hl}$$

$$\text{Vuoden aikan talteenotettu hiilidioksidi} = 75\,000 \text{ hl} \times 3 \frac{\text{kg}}{\text{hl}} = 225\,000 \text{ kg}$$

12.2 Nestemäisen hiilidioksidivaraston kokoluokan määrittäminen

Nestemäisen hiilidioksidivaraston minimikapasiteettina voidaan pitää kolmen päivän aikana tapahtuvan talteenoton nettomäärää. Näin varaudutaan talteenotossa väistämättä tapahtuviin virtauspiikkeihin. (Broderick, 1977, s. 352) Laskettaessa keskiarvollista talteenottomäärää, on otettava huomioon, että 1 litrasta nestemäistä hiilidioksidia saadaan 440 litraa kaasumaista hiilidioksidia (Woikoski, n.d.). Yhden hiilidioksidi kaasulitran massa on 0,001836 kg (Aqua-calc, n.d.). Lasketaan Nokian Panimon kolmen päivän keskiarvoinen hiilidioksidin talteenottomäärä oletetun tuotantomäärän (7 500 000 litraa) mukaan, sekä pienpanimon suurimman tuotantomäärän (15 000 000 litran) mukaan.

Nokian Panimon kolmen päivän keskiarvoinen hiilidioksidin talteenottomäärä vuonna 2022:

$$3 \text{ vuorokauden oluen tuotanto (hl)} = \frac{75\,000 \text{ hl}}{365 \text{ vrk}} \times 3 \text{ vrk} = 616,44 \text{ hl}$$

$$616,44 \text{ hl} \times 3 \frac{\text{kg}}{\text{hl}} = 1849,32 \text{ kg}$$

$$\text{Yksi CO}_2 \text{ kaasulitra massa} = 0,001836 \text{ kg}$$

$$\text{Muutetaan kaasumäärä litroiksi} = \frac{1849,32 \text{ kg}}{0,001836 \frac{\text{kg}}{\text{l}}} = 1\,007\,252,22 \text{ l}$$

$$\text{Hiilidioksidi kaasunmäärä nesteenä} = \frac{1\,007\,252,22 \text{ l}}{440 \text{ l}} = 2\,289,2 \text{ l}$$

Kolmen päivän talteenoton aikana syntyy 2 289,2 litraa nestemäistä hiilidioksidia, näin ollen minimi tilavuus nestemäisen hiilidioksidin varastosäiliölle on 2 289,2 litraa.

Pienpanimon tuotantoa on mahdollista kasvattaa 15 000 000 litraan asti (Verohallinto, 2019). Näin ollen, suurimman mahdollisen pienpanimon nestemäisen hiilidioksidin varastosäiliönkin tulisi olla kaksinkertainen Nokian Panimon oletettuun tuotantoon verrattuna:

$$\text{Nestemäisen hiilidioksidivaraston minimikoko tulevaisuudessa: } 2\,289,2 \text{ l} \times 2 = 4\,578,4 \text{ l}$$

12.3 Talteenottolaitteiston käyttöönotosta saatavat taloudelliset hyödyt

Nokian Panimon hiilidioksidin ostohinta ja ostomäärä ovat salaista tietoa. Tässä työssä käytetään suuntaa antavaa, keskimääräistä hinta-arviota hiilidioksidille: 0,25 €/kg CO₂. (Procurement Resource, 2022) Sekä suuntaa antavaa arviota vuoden 2022 hiilidioksidin ostomäärälle: 350 000 kg.

Lasketaan vuotuinen kustannus hiilidioksidin hankintaan:

$$350\,000 \text{ kg} \times 0,25 \frac{\text{€}}{\text{kg}} = 87\,500 \text{ €}$$

Hiilidioksidin talteenottolaitteiston avulla Panimon tulevaisuuden hiilidioksidin ostotarve olisi:

$$350\,000 \text{ kg} - 225\,000 \text{ kg} = 125\,000 \text{ kg}$$

Hiilidioksidin talteenottolaitteiston käyttöönoton myötä – tuotantomäärän ja hiilidioksidin hinnan pysyessä samana – vuotuiset hiilidioksidin hankinnasta koituvat säästöt olisivat:

$$225\,000\text{ kg} \times 0,25 \frac{\text{€}}{\text{kg}} = 56\,250\text{ €}$$

Hiilidioksidin talteenottolaitteiston käyttöönoton myötä panimon hiilidioksidin vuotuiset ostokustannukset olisivat:

$$125\,000\text{ kg} \times 0,25 \frac{\text{€}}{\text{kg}} = 31\,250\text{ €}$$

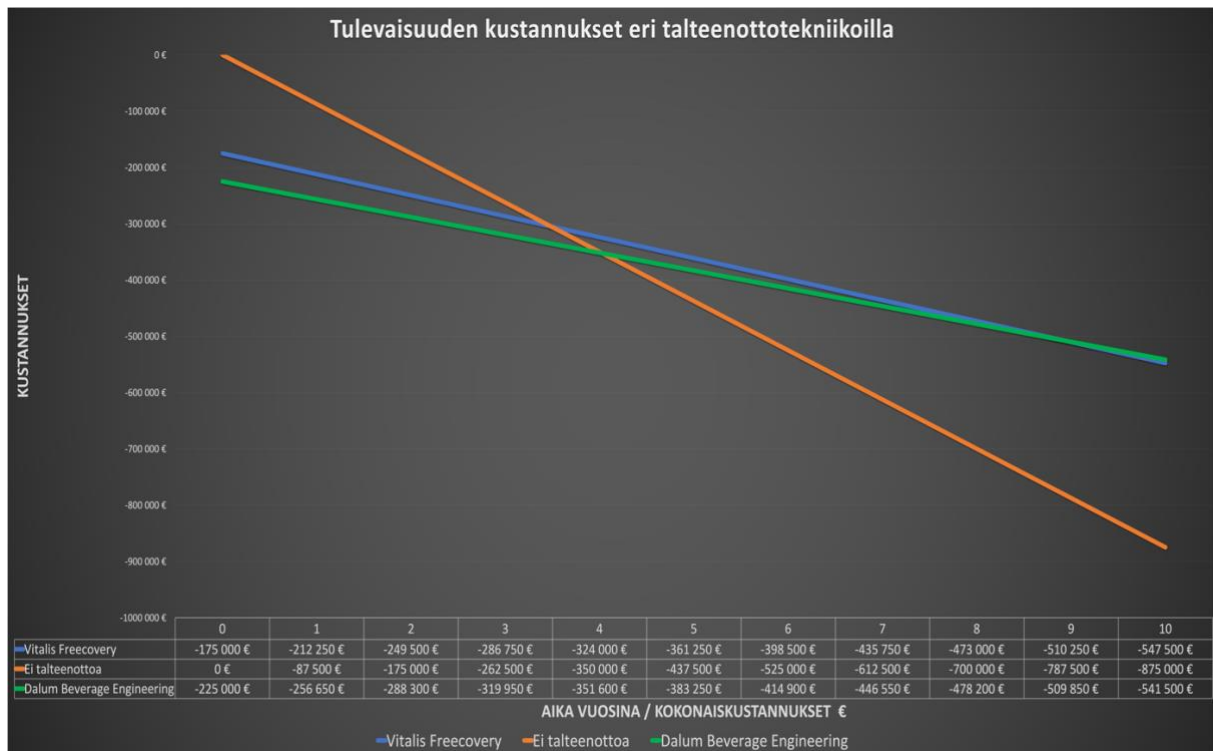
12.4 Laitteistojen vertailu

Työn teoreettisen viitekehyyksen valmistuttua otin yhteyttä muutamaan hiilidioksidin talteenottolaitteisto -kokonaisuuden tarjoavaan yritykseen sähköpostitse. Tarkoituksena oli tehdä vertailua panimon mahdollisten tulevaisuuden yhteistyökumppaneiden välillä. Sähköpostikeskustelun perusteella vertailtaviksi talteenottolaitteistoiksi ja tekniikoiksi valikoitui Yhdysvaltalaisen Vitalis yrityksen Freecovery – laitteisto, ja Tanskalaisen Dalum Beverage Engineering yrityksen Craft & Senior laitteistokokonaisuus. Molemmat kokonaisuudet sopisivat tekniikkansa puolesta osaksi Nokian Panimon tuotantoprosessia. Freecovery-laitteisto edustaa perinteisempää tekniikkaa, jossa välivarastona toimii kaasupallo. Kaasupallon etuihin kuuluu pääkompressorin tehokas toiminta, mutta sen fyysinen koko on haittana. Dalumin kokonaisuus nojaa varta vasten kehitettyyn, kolmivaiheisen kompressorin tekniikkaan, jonka toimesta erilliselle kaasupallolle ei ole tarvetta. Laitteistojen kokonaiskustannusarviot ovat lähellä toisiaan Freecoverin käyttöönottokustannusten (175 000 €) ollessa hieman pienemmät kuin Dalumin (225 000 €), jonka vuotuiset ylläpitokustannukset (400 € / vuosi) ovat merkittävästi Freecoveria (6000 € / vuosi) alhaisemmat. Molemmat yritykset tarjoavat kattavan perehdytyksen laitteistojen toimintoihin ja prosessiin. In-line monitorointivälineet kaasun happipitoisuuden tarkasteluun ja hiilidioksidin virtaukseen kuuluvat molempien laitteistojen repertuaariin. Talteenoton seuranta on molempien kokonaisuuksien kohdalla tehty helpoksi ja automaatio hoitaa prosessia luotettavalla tarkkuudella. Molemmat kokonaisuudet voidaan asentaa osaksi panimon prosessia hyväksikäyttäen jo olemassa olevaa jäähdytysjärjestelmää, sekä nestemäisen hiilidioksidin varastosäiliötä.

Ottaen huomioon vertailtavien hiilidioksidin talteenottolaitteistojen hinta-arviot ja vuotuiset ylläpitokustannukset, voidaan laskea ja vertailla laitteistojen taloudellista kannattavuutta, sekä vertailla panimon tulevaisuuden hiilidioksidin ostokustannuksia talteenottolaitteistolla vs.

ilman (Kuva 22). Kuvan kaaviosta voidaan nähdä eri talteenottolaitteistojen käyttöönotosta syntyvät kustannukset seuraavan 10 vuoden aikana. Kaavion (Kuva 22) kustannustrendejä seurattaessa on hyvä pitää mielessä, että laskutoimitukset ovat tehty olettaen, että hiilidioksidin ostohinta (0,25 € / kg) ja panimon tuotantovolyymi (7,5 miljoonaa litraa) pysyisivät samoina. Tarkoittaen hiilidioksidin talteenotosta (225 000 kg) koituvien vuotuisten hankintasäästöjen pysyvän 56 250 € / vuosi.

Kuva 22. Tulevaisuuden kustannukset eri talteenottotekniikoilla.



13 Pohdinta & Johtopäätökset

Nokian Panimon hiilidioksidin ostohinta koostuu pohjahinnasta ja kuukausittain vaihtuvasta indeksikorotuksesta. Hiilidioksidin keskimääräinen hankintahinta on noussut vuosittain, ja ero vuoden 2021 vs. 2023 hinnalla on huomattava (Kuva 4). Panimolla on varauduttu jopa 40 % hinnan korotuksiin vuoteen 2028 mennessä. Ostetulla hiilidioksidilla on monta käyttökohdetta panimolla, ja samaan aikaan käymisen tuloksena syntyvää hiilidioksidia päästetään ilmakehään. Markkinoilla jo olevan tekniikan avulla ilmakehään päästettävä hiilidioksidi voitaisiin ottaa talteen ja uusiokäyttää Panimon tuotannossa. Tämä vähentäisi merkittävästi hiilidioksidin ostotarvetta.

Talteenottolaitteistoa harkittaessa on otettava huomioon yrityksen tuotantomäärän mahdollinen kasvu tulevaisuudessa. Suomessa pienpanimon suurin sallittu tuotanto on

15 000 000 litraa. Tämän jälkeen panimoa ei luokitella enää pienpanimoksi, eikä sillä ole oikeutta pienpanimotoiminnalle asetettuihin alkoholi- ja alkoholijuomaveron helpotuksiin. (Verohallinto, 2019) Tämä on otettava huomioon hiilidioksidin talteenottolaitteiston hankinnan suunnittelussa niin, että laitteiston koon skaalaus ylöspäin ei tuota ongelmia. Ottaen huomioon Nokian Panimon tehtaan tontin koon rajallisuuden, ja talteenottolaitteiston mahdollisen ylöspäin skaalauksen, on käyttöön soveltuvan talteenottolaitteiston mahdollisimman kompakti koko suotavaa. Nokian Panimo tekee yhteistyötä Air Liquide yrityksen kanssa, jolta panimo ostaa hiilidioksidinsa ja vuokraa nykyisen nestemäisen hiilidioksidin varastoyksikkönsä. Yksikkö sisältää 21 800 litran nestekaasuvarastosäiliön, sekä haihduttimen, joka muuttaa nestemäisen hiilidioksidin kaasuksi panimon käyttöön. Air Liquide toimittaa nestemäisen hiilidioksidin yritykselle säiliöautolla suoraan varastosäiliöön. Käytössä olevan varastosäiliön tilavuuden tulisi riittää, vaikka panimon tuotanto kolminkertaistuisi tulevaisuudessa 15 miljoonaan litraan, varastosäiliön minimikoon kasvaessa täten n. 5 000 litraan. Luku viittaa kuitenkin vain oluen tuotantoon. Ottaen huomioon panimon virvoitusjuomatuotannon ja sen vaikutukset hiilidioksidin ostotarpeeseen, on kyseistä varastosäiliötä turha vaihtaa pienempään.

Kaaviosta (Kuva 22) voidaan nähdä, että tarkasteltujen talteenottolaitteistojen takaisinmaksuaika olisi noin 4–5 vuotta. 10 vuoden käytön jälkeen Dalumin laitteisto olisi taloudellisesti kannattavin vaihtoehto, sen kokonaiskustannusten ollessa tällöin 541 500 €. Ilman talteenottolaitteiston ansiosta koituvia taloudellisia hyötyjä, hiilidioksidin hankintakustannukset olisivat panimolle 10 vuoden päästä 875 000 €. Energiakriisi ja maakaasun hinnan nousu ovat suoraan yhteydessä hiilidioksidin markkinahintaan (Kuva 4). Panimon mahdollinen oluen tuotantovolyymien kasvu ja nestemäisen hiilidioksidin todennäköinen hinnan nousu vaikuttaisivat molempien talteenottolaitteistojen käyttöönoton kannattavuuteen positiivisessa mielessä, koska näin saataisiin enemmän – markkinahinnaltaan kallista – hiilidioksidia talteen. Näin ollen kaavion (Kuva 22) kustannustrendit / viivat leikkaisivat toisensa aikaisemmin, laitteistojen takaisinmaksuajat olisivat lyhyempiä, ja tulevaisuuden säästöt talteenottolaitteiston käyttöönotosta merkittävämpiä. Talteenottolaitteistojen etuna on myös panimon kestävämmän tuotannon ja ekologisuuden tuomat imagolliset edut, joiden myötä yrityksen tuotteiden kysyntä markkinoilla voi kasvaa. Näin ollen panimon on mahdollista kasvattaa vuosittaista tuotantovolyymia suunniteltua nopeammin. Jotta ennen talteenottolaitoksen hankintaa päästäisiin tarkempaan arvioon panimon potentiaalisesta talteen otettavan hiilidioksidin määrästä, olisi panimon käymisprosessin seurantamenetelmiin hyvä harkita pieniä muutoksia:

- a) Uutemäärän mittausfrekvenssin nopeuttaminen auttaisi ennustamaan & varmistamaan eksponentiaalisen käymisen ja tätä myötä hiilidioksidin talteenoton todellisen ajankohdan
- b) Hiilidioksidin ulospuhallusputkeen asennettavan kaasuvirtausmittarin ja happipitoisuuden mittalaitteen avulla varmistettaisiin talteen otettavan hiilidioksidin todellinen virtaus ja määrä sekä happipitoisuus

Dalumin laitteistossa huomionarvoista on sen kompressoritekniikka, joka mahdollistaa talteenottolaitteiston tehokkaan käytön ilman tilaa vievää välivarastoa. Yritys on kehitellyt varta vasten kolmivaiheisen kompressorin, joka käyttää panimon omaa jäähdytysjärjestelmää kompressoidessaan kaasun 600 psi paineeseen kolmessa vaiheessa. Näin säästetään talteenottolaitteiston ottamassa tilassa panimolla, sekä erillisen jäähdytysjärjestelmän asennuksessa. Erona kahden toimittajan välillä on myös se, että Dalumin systeemiä käytetään jo Suomessa muun muassa Fat Lizard Brewing Company panimolla. Sähköpostikeskustelun myötä saatu kutsu vierailulle panimoon mahdollistaa systeemin tarkastelun paikan päällä, antaen arvokasta informaatiota laitteiston toiminnasta suomen olosuhteissa, sekä yleistä tietoa laitteiston käyttökokemuksesta. Seuraava askel kohti Nokian Panimon hiilidioksidin talteenottolaitteiston hankintaa onkin vierailu Fat Lizard Brewing Company panimolla.

Lähteet

Aatos, S., Arasto, A., Koljonen, T., Kujanpää, L., Kärki, J., Lehtilä, A., Nieminen, M., Teir, S., Tsupari, E. *Hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin (CCS:n) soveltaminen Suomen olosuhteissa*. VTT.

<https://pdfs.semanticscholar.org/baea/75bdabf6d0aa0881dd8145d8bda264e030ec.pdf%20s.28>

Abbot, J., Baliunas, S., Breheny, S., Carter, B., Driessen, P., Heller, T., Idso, C., James, C., Lomborg, B., Marohasy, J., Michaels, P., Nicol, J., Nova, J., Plimer, I., Qiork, T., Ridd, P., Ridley, M., Ring, K., Scafetta, N., ... Watts, A. (2017). *Climate Change the Facts 2017*. Connor Court Publishing Pty Ltd.

Ansari, M.B., Gai, S., Gulzar, Aa., Gulzar, Ar., He, F., Yang, P. (2020). *Carbon dioxide utilization: A paradigm shift with CO2 economy*. Chemical Engineering Journal Advances. Volume 3. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666821120300132#fig0001>

Air Liquide. (n.d.). *ALIGAL 2*. Haettu 28.11.2023 osoitteesta

<https://mygas.airliquide.fi/catalog-gas-products/aligal%E2%84%A2-2>

Atlas Scientific. (2023). *4 Methods of Capturing CO2 From Fermentation*. <https://atlas-scientific.com/blog/capturing-co2-from-fermentation/>

Berninger, K., (2012). *Hiilineutraali Suomi*. Gaudeamus Oy.
Hiilineutraali Suomi.

Biosykli, (2022). *Muut käyttökohteet: Hiilidioksidin käyttö*. LAB Ammattikorkeakoulu.

<https://sites.google.com/lab.fi/biosykli-co2/k%C3%A4ytt%C3%B6kohteet/muut-k%C3%A4ytt%C3%B6kohteet>

Bonatto, D., (2022). *The multiple roles of lipid metabolism in yeast physiology during beer fermentation*. PMC PubMed Central.

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9511687/>

Bovet, P., Rekacewicz, P., Sinai, A. & Vidal, D. (2008). *Ympäristöatlas*. (T. Heikkilä, K. Järventaus, N. Saikkonen & E. Salmi, käänt). Like. (Alkuperäisteos julkaistu n.d.)

Broderick, Harold M., (1977). *The Practical Brewer*. Master Brewers Association of the Americas.

Carnegie Mellon University. (2023). *Carbon Dioxide and Water*.

<https://www.andrew.cmu.edu/course/09-106/Chapters/06.Carbon%20Dioxide%20and%20water>

Chmiel, K., Kus, T., Madejski, P., Subramanian, N. (2022). *Methods and Techniques for CO₂ Capture: Review of Potential Solutions and Applications in Modern Energy Technologies*.

MDPI. <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/3/887>

CO₂ Meter. (2016). *Beer Fermentation and CO₂*.

<https://www.co2meter.com/blogs/news/7010354-beer-fermentation-and-co2>

Doering, C., (2020). *A look behind beer's hidden secret to success: carbon dioxide*. Food

Dive. <https://www.fooddive.com/news/a-look-behind-beers-hidden-secret-to-success-carbon-dioxide/586349/>

Dornbusch, H., (2023). *The CO₂ Shortage in the International Brewing Industry – Part 3*.

myBeviale. <https://www.mybeviale.com/en/stories/2023/fachbeitrag/the-co2-shortage-in-the-international-brewing-industry-part-3>

Edinburgh Sensors. (2022). *CO₂ Measurement for Drink Carbonation and Brewery Safety*.

<https://edinburghsensors.com/news-and-events/drink-carbonation-co2-brewing-and-brewery-safety/>

Enari, T-M. & Mäkinen, V. (2014). *Panimotekniikka*. Grano Oy.

First Key. (n.d.). *Looking Closer at CO₂ Recovery at Your Brewery*.

<https://firstkey.com/looking-closer-at-co2-recovery-at-your-brewery/>

Gadd, E., (2022). *CO₂ capture in a small brewery – a case study*. BREWblog.

<https://gaddsbeershop.blogspot.com/2022/09/co-2-capture-in-small-brewery-acase.html>

Gallagher, K., (2023) *Carbon Dioxide in Water Solubility & Reaction: Is CO₂ Soluble in*

Water. <https://study.com/academy/lesson/solubility-of-carbon-dioxide-in-water-conditions-lechateliers-principle.html>

Global Monitoring Laboratory. (n.d.). *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide*. [kuva]. Haettu 18.9.2023 osoitteesta <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>

Gribbins, K., (2022). *The CO2 Shortage: How is CO2 used within a craft brewery*. Craft Brewing Business.
<https://www.craftbrewingbusiness.com/featured/the-co2-shortage-part-2-how-is-co2-used-in-the-craft-brewing-process/>

Helen. (2020). *Kaikki mitä olet halunnut tietää hiilidioksidista – ja vähän enemmänkin*.
<https://www.helen.fi/artikkelit/2020/hiilidioksidi>

Hengko. (n.d.) Diffusion Stone and Carbonation Stone [kuva].
<https://www.hengko.com/microns-diffuser-carbonation-stone/>

Drake, M., Nurmi, N., Tammilehto, P. (2022). *Hiilidioksidipula sulkee panimoita Euroopassa – Suomalaispanimon johtaja: ”Tällaista ei ole aiemmin ollut”*. Kauppalehti.
<https://www.kauppalehti.fi/uutiset/hiilidioksidipula-sulkee-panimoita-euroopassa-suomalaispanimon-johtaja-tallaista-tilannetta-ei-ole-aiemmin-ollut/cf73dc52-f007-45f1-a3a5-8432495064e0>

IEA. (n.d.). *Carbon Capture, Utilization and Storage*. International Energy Agency.
<https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage>

Ilmasto – opas. (n.d.-a). *Hiilidioksidi ja hiilen kiertokulku*. <https://www.ilmasto-opas.fi/artikkelit/hiilidioksidi-ja-hiilen-kiertokulku>

Ilmasto – opas. (n.d.-b) *Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi*. <https://www.ilmasto-opas.fi/artikkelit/hiilidioksidin-talteenotto-ja-varastointi>

Koponen, J., (2018). Tiesitkö, että virvoitusjuomasi kuplat ovat usein muun teollisuuden sivutuotetta. Yleisradio. <https://yle.fi/a/3-10404460>

Korteniemi, J., (2016). *Kemiallinen joulukalenteri 10/24: Hiilihapollista sihijuomaa*.
<https://www.tiedetuubi.fi/taxonomy/term/846>

Leiden, K., (2019). *Why and how we brew with CO2*. Zephyr.
<https://zephyrsolutions.com/why-and->

[how-we-brew-with-co2/](#)

Lund, K., (n.d.) *Carbon capture and storage or utilization (CCS / CCU)*. VTT.

<https://www.vttresearch.com/en/ourservices/carbon-capture-and-storage-or-utilization-ccs-ccu>

Myllyviita. (n.d.). *Le Catelierin periaate – 10.10*. Viikin normaalikoulun kemian blogi.

<https://myllyviita.fi/kemia/?p=71>

National Oceanic and Atmospheric Administration (n.d.). *Carbon Cycle*.

<https://www.noaa.gov/education/resource-collections/climate/carbon-cycle>

Pennanen, R., (2023). *Euroopan olutpanimot kärsivät hiilidioksidipulasta – samaan aikaan CO2 – päästöjä tuupataan taivaalle ympäri maailmaa*. Yleisradio. <https://yle.fi/a/74-20017938>

Procurement Resource. (2022). *Ammonia and Liquid Carbon Dioxide Prices are Set To skyrocket Further Due to Rising Natural Gas Prices*.

<https://www.procurementresource.com/news-and-articles/ammonia-and-liquid-carbon-dioxide-prices>

Simell, S., (2023). *Hiilidioksidin Talteenoton ja Varastoinnin Nykytila* [opinnäytetyö, Lappeenrannan – Lahden teknillinen yliopisto LUT].

https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/165509/kandidaatintyo_simell_sara.pdf?sequence=1

Sinebrychoff. (n.d.). *Oluen valmistus Sinebrychoffilla*. <https://www.sinebrychoff.fi/olut/oluen-valmistus-sinebrychoffilla/>

Sintrol. (2023). *Hiilidioksidin talteenotto* [kuva]. Haettu 5.12.2023 osoitteesta

<https://sintrol.fi/product/hiilidioksidin-talteenotto/>

Siikalatvan Lukio. (n.d.). *Soluhengityksen vaiheet* [kuva].

<https://peda.net/siikalatva/siikalatvan-lukio/oppiaineet/biologia/bi4-ihmisen-biologia-2021/5.-hengitysta-tapahtuu-kaikkialla-elimistossa>

Solunetti. (2006). *Solun Aineenvaihdunta*.

https://www.solunetti.fi/fi/solubiologia/solun_aineenvaihdunta/2/

Suomen Ympäristökeskus. (2023). *Ilmastonmuutos vaatii nopeaa toimintaa*. Ympäristöhallinnon verkkopalvelu. <https://www.ymparisto.fi/fi/ilmasto-muutoksessa/ilmastonmuutos-vaatii-nopeaa-toimintaa>

Sysilä, I., (1994). *Ohrapellosta Etiketin Taakse*. Sysilä. Sysilä.

Teir, S., Pikkarainen, T., Kujanpää, L., Tsupari, E., Kärki, J., Arasto, A. & Aatos, S. 2011. *Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CSS)*. VTT. <https://publications.vtt.fi/pdf/workingpapers/2011/W161.pdf>

Tilastokeskus. (2022). *Kasvihuonekaasupäästöt vuonna 2021 pienessä nousussa*. <https://www.stat.fi/julkaisu/cktf0i203azm0a519to5exzc>

Tiedonportaila. (n.d.) *Korallit ja korallieläimet*. <https://www.tiedonportaila.fi/korallit/>

Ulkoministeriö. (n.d.). Suomen ilmastoulkopolitiikkaa. <https://um.fi/ilmastoulkopolitiikka>

United Nations. (n.d.). *What is the Kyoto Protocol*. https://unfccc.int/kyoto_protocol

Verohallinto. (2019). *Pienpanimoalennus Suomessa*. <https://www.vero.fi/syventavat-vero-ohjeet/ohje-hakusivu/48587/pienpanimoalennus-suomessa/>

Vitalis. (19.7.2023). *CO2 Independence: What You Need to Know About CO2 Capture and Storage Systems for Breweries*. [video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=bzbSMxE-QPY>

White, C & Zainasheff, J., (2010). *Yeast: the practical guide to beer fermentation*. Brewers Publications.

Woikoski. (n.d.). *Hiilidioksidi CO2*. Haettu 12.10.2023 osoitteesta <https://www.woikoski.fi/hitsaus/hitsauskaasut/hiilidioksidi.html>

Aqua-calc. (n.d.). *Calculate weight of compounds and materials per volume*. <https://www.aqua-calc.com/calculate/volume-to-weight>

Ympäristöministeriö. (n.d.-a) *Kansainvälinen ilmastopolitiikka*. <https://ym.fi/kansainvalinen-ilmastopolitiikka>

Ympäristöministeriö. (n.d.-b). *Pariisin ilmastopöytäkirja*. [https://ym.fi/pariisin-ilmastopöytäkirja](https://ym.fi/pariisin-ilmastopoytakirja)

Ympäristöministeriö. (n.d.-c). *Suomen kansallinen ilmastopolitiikka*. <https://ym.fi/suomen-kansallinen-ilmastopolitiikka>