

Meriel Vainikainen

# Paahdetusta kahvista vapautuvan hiilidioksidin mittaaminen kaasuntunnistusanalysointorilla

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Bio- ja elintarviketekniikka

Insinööryö

15.5.2014

Tekijä Otsikko  Sivumäärä Aika	Meriel Vainikainen Paahdetusta kahvista vapautuvan hiilidioksidin mittaaminen kaasuntunnistusanalysaattorilla  39 sivua + 2 liitettä 15.5.2014
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Bio- ja elintarviketekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Biolääketiede
Ohjaajat	Senior Product Development Manager Karla Koullias Process Development Engineer Janne Nikula  yliopettaja Veli-Matti Taavitsainen
<p>Insinööriyössä tutkittiin kaasuntunnistusanalysaattorin käyttömahdollisuuksia paahdetusta kahvista vapautuvan hiilidioksidin mittaamisessa. Hiilidioksidin poistumisnopeuteen vaikuttavia, tarkasteltavia tekijöitä olivat muun muassa kahvilaji, paahtoaste ja jauhatuksen karkeus. Tavoitteena oli tutkia, miten eri kahvituotteet vapauttavat hiilidioksidia eli kaasuuntuvat, ja voidaanko kahvin läpimenoaikaa tehostaa lyhentämällä kaasuuntumisaikaa. Tuotantoprosessin nopeuttaminen pienentäisi kustannuksia ja parantaisi tuotteiden laatua. Tarkoituksena oli myös selvittää, voidaanko kaasuuntumisen kulkua ennustaa ja sen perusteella ennakoida ajanhetki, jolloin kahvi on valmista pakattavaksi.</p> <p>Työssä mitattiin välivarastointisiiloissa olevien kahvierien hiilidioksidipitoisuuden muutosta. Jokaisesta erästä selvitettiin, milloin se oli paahdettu ja jauhettu. Saman tuotteen tuloksia verrattiin toisiinsa, ja niistä etsittiin samankaltaisuutta ja säännönmukaisuuksia. Tutkittiin näytteenottopään sijainnin vaikutusta tuloksiin. Sen perusteella päätettiin, että optimaalisin mittauskorkeus on kaasuuntumissiilon puolivälissä.</p> <p>Kaasuuntumiskäyrän kulkua tutkittiin kahden matemaattisen mallin ja käyrän kulmaker toimien muutoksen avulla, kummallakaan menetelmällä ei saatu toivottuja tuloksia. Mittausten perusteella voitiin osoittaa, että tumma, hienoksi jauhettu, robustaa sisältävä kahvi kaasuuntuu voimakkaammin kuin vaalea, karkeajauhatuksinen arabicakahvi. Kaasuuntumiskäyrä nousee jyrkemmässä kulmassa ja hiilidioksidipitoisuudet ovat korkeampia. Mittaukset viittasivat siihen, että pieni erä kaasuuntuu heikommin kuin normaalikokoinen erä. Todennäköisempi tulkinta on, että vajaassa siilossa kaasutilan hiilidioksidipitoisuus ei nouse samalla tavoin kuin jos siilo on täysi. Selvitettiin myös, miten kahvin stabiloitumisajan (paahdon jälkeen kosteuden annetaan tasoittua kahvipavuissa) pituuden vaikutusta kaasuuntumiseen. Todettiin, että normaalia pidempään stabiloituneen kahvin ei tarvitse kaasuuntua niin kauan kuin kahvin, jonka stabiloitumisaika on standardisoitujen rajojen sisällä.</p> <p>Saadut tulokset loivat pohjan jatkotutkimukselle, jossa kootaan järjestelmällisesti tietoa kustakin tuotteesta eri tuotanto-olosuhteissa ja tutkitaan kaasuuntumiseen vaikuttavien tekijöiden riippuvuussuhteita.</p>	
Avainsanat	kaasuuntuminen, jauhaminen, paahdettu kahvi

Author Title	Meriel Vainikainen Release of carbon dioxide from roasted coffee measured by a gas analyzer
Number of Pages Date	39 pages + 2 appendices 15 May 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Biotechnology and Food Engineering
Specialisation option	Biomedical Technology
Instructors	Karla Koullias, Senior Product Development Manager Janne Nikula, Process Development Engineer  Veli-Matti Taavitsainen, Principal Lecturer
<p>In this thesis, it was examined if it was possible to use a gas analyzer to measure release of carbon dioxide from roasted coffee. The factors examined, which affect coffee degassing, were among other things coffee species, roasting degree and coarseness of coffee ground. The aim of the project was to investigate how coffee products degas i.e. release carbon dioxide and whether coffee production process could be enhanced by shortening degassing times. This would lower the production costs and improve product quality. Another objective was to experiment if the coffee degassing curve could be predicted by using mathematical modelling.</p> <p>In the project, the carbon dioxide concentration of coffee batches in degassing silos was measured by gas analyzer. It was determined when each degassing batch had been roasted and ground. Similarities and patterns were searched in the data. It was examined what kind of an effect the measuring height has on the results. Based on the measurements, it was decided that the optimal measuring height is in the middle of the degassing silo.</p> <p>The plot of the degassing curve was modelled mathematically and by studying slopes of the curves. Neither method proved to be successful. The measurements substantiated that dark roast, fine ground coffee releases more carbon dioxide at a more rapid pace than light roast, coarse ground coffee. It was also known that coffee blends with robusta degas more than arabica blends. The results indicated that a small batch degasses less than a normalized. The effect of coffee's moisture stabilization time after roasting was also researched. The longer coffee has stabilized after roasting, the shorter degassing time is required.</p> <p>The results acquired are merely a stepping stone to future projects in which further information of each product under different conditions is collected. It is important to examine correlations of the factors affecting degassing.</p>	
Keywords	degassing, grinding, roasted coffee

# Sisällys

## Käsiteluettelo

1	Johdanto	1
2	Oy Gustav Paulig Ab	2
3	Kahvin viljely	3
4	Kahvin valmistusprosessi	7
4.1	Raakakahvi	7
4.2	Tuotannon suunnittelu	7
4.3	Paahto	8
4.3.1	Fysikaaliset muutokset	10
4.3.2	Kemialliset muutokset	12
4.4	Jauhaminen	13
4.5	Kaasuuntuminen	14
4.6	Pakkaaminen	15
5	Kaasuuntumiseen vaikuttavat tekijät	16
5.1	Kaasuuntumisajan määrittäminen	17
5.2	Map Check 3 -analysointori	18
5.3	Kaasuuntumismittaukset	20
6	Tulokset	22
7	Yhteenveto	33
8	Pohdinta	35
	Lähteet	38
	Liitteet	
	Liite 1. Map Check 3 -analysointorin pikakäyttöohje	
	Liite 2. R-ohjelmalla matemaattisessa mallintamisessa käytetty komentotiedoston koodi	

## Käsiteluettelo

Alkuperämaakahvi	Valmistetaan tietyistä maista tai tietyiltä alueelta tulevista pavuista, joilla on oma ainutlaatuinen makuvivahteensa. Esimerkiksi Paulig Kenya, Paulig Guatemala ja Paulig New Papua Guinea ovat alkuperämaakahveja.
Jauhatusaste	Uuttopinta-alan lisäämiseksi pavut hienonnetaan kahvijauheeksi. Kahvi voidaan jauhaa esimerkiksi karkeaksi, puoli-karkeaksi, hienoksi tai erittäin hienoksi. Jauhatusaste valitaan käyttötarkoituksen mukaan: mitä kauemmin kahvi on tekemisissä veden kanssa, sitä karkeampaa kahvijauhetta käytetään. Tavoitteena on saada paras mahdollinen maku kullakin kahvin valmistusmenetelmällä.
Kaasuuntumisaika	Jauhamisen ja pakkaamisen välissä kahvin annetaan kaasuuntua eli vapauttaa hiilidioksidia kaasuuntumissiilossa, mitä kutsutaan kaasuuntumisajaksi. Eri kahvituohteilla on eri kaasuuntumisajat. Hiilidioksidin lisäksi kahvista vapautuu muitakin kaasuja, tässä insinööriyössä kaasuuntumisesta puhuttaessa tarkoitetaan hiilidioksidin vapautumista.
Kahvisekoitus	Sekoitetaan useita eri papulaatuja monivivahteisen maun saamiseksi ja kahvin tasalaatuisuuden varmistamiseksi. Kullakin tuotteella on oma makuprofiilinsa. Esimerkiksi Juhla Mokka ja Presidentti ovat kahvisekoituksia.
Paahtoaste	Pauligin paahtoastemittarissa on 5 paahtoastetta, joilla kuvataan kahvipavun tummuutta. Asteikolla 1 on vaalein ja 5 on tummin.
Partikkelikokojakauma	Kahvijauheessa on erikokoisia partikkeleita, jotka voidaan jakaa esimerkiksi viiteen kokoluokkaan. Se, kuinka suuri osuus jauheesta kuuluu mihinkin luokkaan, kertoo jauheen karkeusasteen.

## 1 Johdanto

Kahvipavussa tapahtuu paahtamisen aikana monia fysikaalisia ja kemiallisia muutoksia. Papu muuttaa väriä, tulee hauraammaksi ja laajenee, kun sen sisään muodostuu painetta. Painetta aiheuttavat papuun muodostuva hiilidioksidi ja haihtuvasta vedestä tuleva vesihöyry. Kahvipapu on rakenteeltaan huokoinen ja täynnä pieniä onkaloita kuten pesusieni. [1, s. 26.] Kun pavun sisäinen paine kasvaa suuremmaksi kuin ulkoinen paine, kaasut pääsevät vapautumaan. Hiilidioksidin vapautumisnopeus riippuu useista tekijöistä, muun muassa kahvilajista, paahto- ja jauhatusteesta. [1, s. 66.] Kun kahvi pakataan vakuumpakkaukseen tai venttiilitömään suojakaasupakkaukseen, kahvia seisotetaan jauhamisen jälkeen siilossa, jossa kaasun vapautuminen jatkuu, kunnes riittävä määrä hiilidioksidia on poistunut. Tätä välivarastointia jauhamisen ja pakkaamisen välissä kutsutaan kaasuuntumisajaksi. Kun noin 60 % hiilidioksidista on vapautunut, kahvi voidaan pakata. Mikäli vastajauhettu kahvi pakataan heti, hiilidioksidin vapautuminen jatkuu paketissa. Pakkaukset, joissa käytetään tyypeä suojakaasuna, paisuvat hiilidioksidin vaikutuksesta. Kun taas vakuumpakkaukset, joista imetään ilma pois, pehmenevät alipaineen pienetessä. Hiilidioksidin vapautuessa kahvista poistuu myös haihtuvia aromiaineita ja muita kaasuja, joten parhaan laadun ja kustannusten kannalta olisi hyödyllistä, että kahvi pakattaisiin mahdollisimman nopeasti jauhamisen jälkeen. [1, s. 55; 2, s. 212; 3, s. 131.]

Insinööriyö on tehty yhteistyössä Oy Gustav Paulig Ab:n kanssa. Työn tarkoituksena on tutkia kahvin kaasunvapautumista Map Check 3 -kaasuuntunnistusanalysointilaitteella. Kahvitehtaalla oli kokeiltavana samalta laitevalmistajalta vastaavanlainen analysointilaitteisto, jolla tehtiin mittauksia vuoden 2012 keväällä. Lupaavien tulosten innoittama päätettiin investoida omaan analysointilaitteeseen ja tutkia asiaa lisää. Analysointilaitteella saatuja tuloksia verrataan tuotteiden nykyisiin kaasunvapautumisaikoihin sekä muiden kaasunvapautumisaikojen määrittämismenetelmien antamiin tuloksiin. Kahvin oletetaan kaasunvapautuvan kirjallisuudessa esitettyjen teoriaseikkojen mukaan. Kullakin kahvituotteella pitäisi olla yksilöllinen, toistettava ja ennakoitava tulos.

Mikäli tuotteiden kaasunvapautumisaikoja voidaan lyhentää, koko prosessi nopeutuu, tuotannon suunnittelu helpottuu, ja saadaan entistä laadukkaampaa kahvia. Kaikki lisätieto kaasunvapautumisesta on arvokasta. Olisi myös mielenkiintoista tutkia tuotteita, joilla on pitkä kaasunvapautumisaika ja joiden kanssa on ollut ongelmia.

## 2 Oy Gustav Paulig Ab

Vuonna 1876 saksalainen Gustav Paulig perusti Helsinkiin muun muassa raakakahvia, mausteita, sokeria ja riisiä myyvän yrityksen. Kahvipavut ostettiin raakakahvina, jotka prännättiin eli paahdettiin itse kotona. Ensimmäinen logo, Pauligin piirtämä P-merkki, otettiin käyttöön 1880-luvulla merkiksi tuotteiden laadusta. Helpottaakseen perheenemäntien arkea Paulig alkoi myydä paahdettuja kahvipapuja. Pohjoismaiden ensimmäinen kahvipaahtimo perustettiin Katajanokalle. Gustav Pauligin kuoltua vuonna 1907 leski Bertha Paulig jatkoi yhtiön johdossa. Paahdetun kahvin suosio kasvoi hiljalleen ja vasta vuonna 1926 sen menekki ylitti raakakahvin menekin. Aluksi kahvi toimitettiin kauppoihin 5 kg:n pakkauksissa, josta kauppias punnitsi asiakkaan pyytämän määrän. Vuonna 1924 asiakaspalautteen johdosta markkinoille tuotiin 250 ja 500 g:n kuluttajapakkaukset. 25. juhlavuotena lanseerattiin yhtiön ensimmäiset tuotemerkit: Juhlasekoitus ja Presidentin sekoitus. Vuonna 1931 Paulig alkoi myydä valmiiksi jauhettua kahvia. Pakkauksiin lisättiin päivämääräleimat takeeksi tuoreudesta. Vuodesta 1936 lähtien yhtiön mainoslauseena on ollut ”Tietysti Pauligin”. [4; 5, s. 117.]

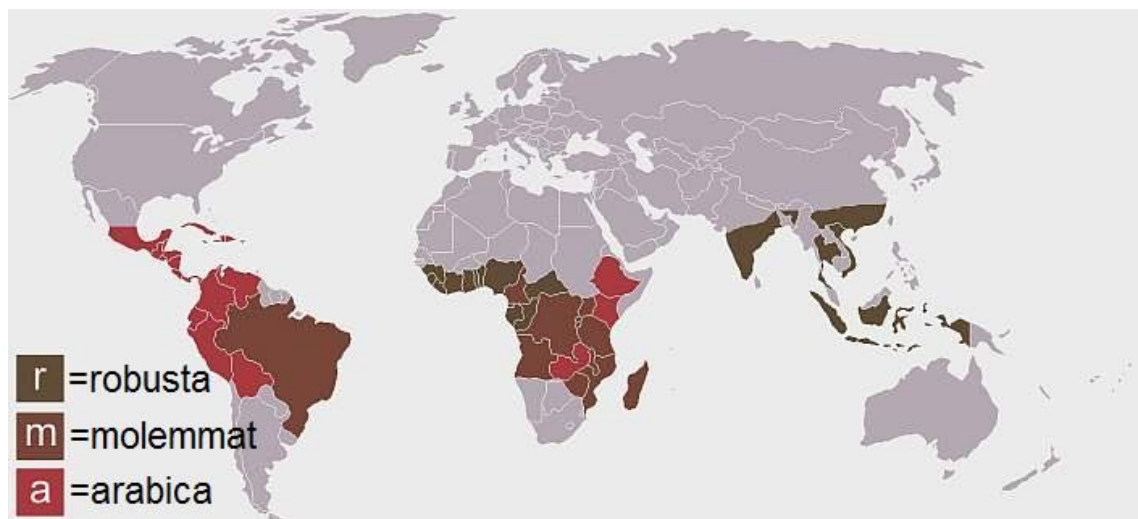
Uutta paahtimoa varten hankittiin tontti Vuosaaresta vuonna 1968. Kultaisesta kahvikupista muodostui maailman parhaiden kahvinautintojen symboli. Paahtimoa uusittiin, ja sitä myötä otettiin käyttöön uudet paahto- ja pakkausmenetelmät. 1990-luvulla yritys panosti kansainvälisyyteen, ja toimintaa laajennettiin Eestiin ja Venäjälle. Vuonna 2006 tehtiin päätös tehtaan siirtämisestä. Vanhan tehtaan ympärille oli noussut asutusalue, tilat olivat käyneet pieniksi eikä laajennuksille ollut tilaa. Uusi paahtimo nousi muutama kilometrin päähän, lähemmäksi satamaa hyvien kuljetusyhteyksien varrelle. Viralliset avajaiset pidettiin tammikuussa 2010. [4]

Paulig Group -konsernin toimialoja ovat kahvi, teollisuusmausteet sekä maailman ruoka ja maustaminen. Suomessa toimivan kahviyhtiön nimi on Oy Gustav Paulig Ab, joka tuottaa kahvia ja myy muun muassa kahvi- ja kaakaotuotteita sekä kahvilaitteita. Tunnetuimmat tuotemerkit ovat Juhla Mokka- ja Presidentti-kahvit. Muita tuotteita ovat muun muassa Brazil, Paulig Mundo, Paulig Espresso, kylmä maitokahviuoma Frezza, Tazza-kaakaojuomatiiviste sekä Paulig alkuperämaakahvit, joissa on käytetty vain yhdestä maasta tai yhdeltä alueelta tulevia kahvipapuja. [4]

### 3 Kahvin viljely

Kahvi on kotoisin Etiopiasta, josta se on sittemmin kulkeutunut yli 60 maahan. Legendan mukaan vuohet olivat syöneet kiiltävälehtisen puun punaisia marjoja ja olivat tavallista virkeämpiä. Etiopialainen paimen ihmetteli laumansa käytöstä, ja päätti itsekin maistaa marjoja. Miedontaakseen kitkerien marjojen makua, ne keksittiin sekoittaa kuumaan veteen. Ensimmäiset varmat merkinnät kahvin viljelystä ovat 1400-luvulta Arabian niemimaalta Jemenistä. Mokasta, Jemenin tärkeimmästä satamakaupungista, kahvipapuja kuljetettiin edelleen Intiaan, Jaavaan (Indonesiaan) ja Venetsiaan. Kahvi oli tarkoin varjeltu salaisuus, ja vaikka itämiskykyisten papujen maastavienti kiellettiin, innokkaimmat kahvin ystävät löysivät mitä erilaisimpia salakuljetuskeinoja. [5, s. 7–11.]

Kahvia viljellään Kauriin kääntöpiirin ja Kravun kääntöpiirin välisellä trooppisella vyöhykkeellä kuvassa 1 näkyvissä maissa. Merkittävimpiä viljelymaita ovat Brasilia, Vietnam, Indonesia, Kolumbia, Intia ja Meksiko. Kahvikasvi luokitellaan *Rubiaceae*-heimoon. Kahvilajeja on kymmeniä, mutta vain kahta viljellään kaupallisessa tarkoituksessa: *Coffea arabica* eli arabica ja *Coffea canephora* eli robusta. [3, s. 9.] Kahvipuu voi kasvaa jopa 7-metriseksi, mutta viljelmillä kasvit pidetään matalina pensaina sadonkorjuun helpottamiseksi. Oksia leikkaamalla kasvi saadaan kasvamaan korkeuden sijasta leveyttä. Pensas alkaa tuottaa satoa noin 2–4 vuoden ikäisenä, ja marjojen tuotto voi jatkua jopa 25 vuoteen asti. [5, s. 17.]



Kuva 1. Kahvin viljelyalueet jaoteltuna lajeittain [6].

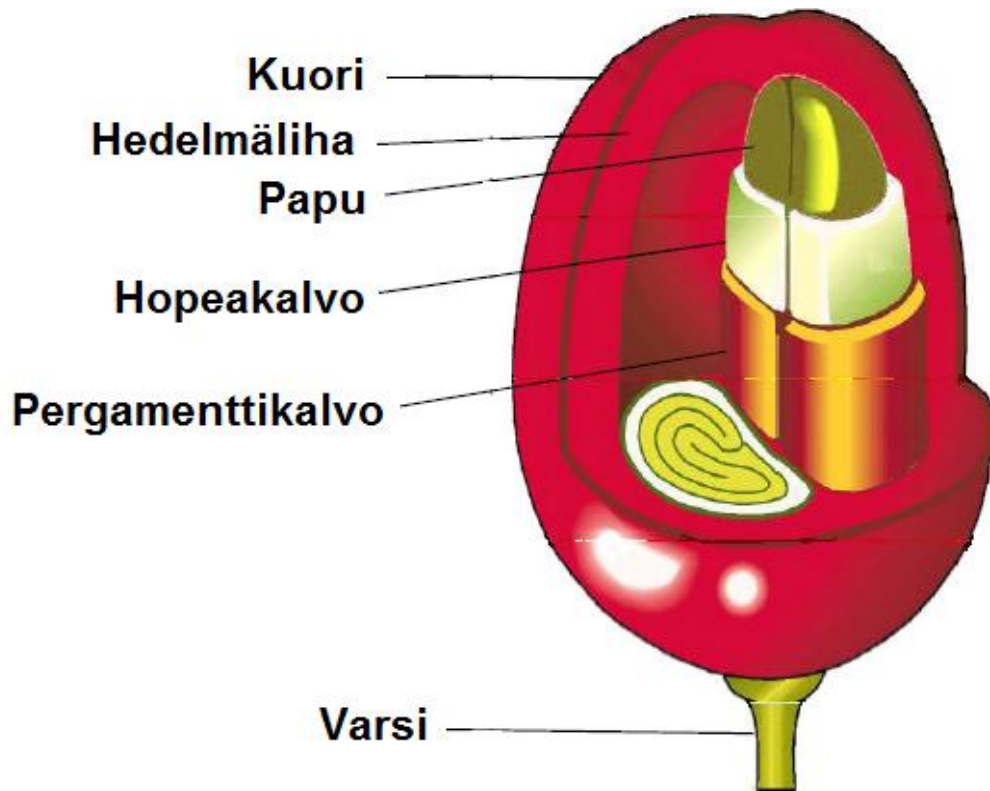


Kahvimarjat ovat noin 1,5 cm halkaisijaltaan, ja ne kasvavat 2–19 marjan tertuissa oksan ympärillä kuvan 2 osoittamalla tavalla. Raaka marja on vihreä, kypsinä marjat ovat punaisia tai keltaisia. Kahvipensas alkaa kukkia yleensä sateen jälkeen, ja marjojen kypsyminen kestää arabicalla 7–9 kuukautta ja robustalla 9–11 kuukautta. [3, s. 11–12.] Kuten kuvasta 2 näkyy, marjat kypsyvät keskenään hyvin eriaikaisesti: samassa pensaassa voi olla kukkia sekä raakoja ja kypsiä marjoja. Yhden pensaasta saadaan noin 400 g kahvia. [5, s. 17.] Hedelmälihan sisällä on glukoosikerroksen alla pergamenttimainen kalvo, jonka sisällä ohuen hopeanvärisen kalvon (kutsutaan hopeakalvoksi) suojassa on kaksi siementä, kahvipapua (kuva 3) [5, s. 17].



Kuva 2. Kahvipensas, jossa on raakoja ja kypsiä kahvimarjoja [7].

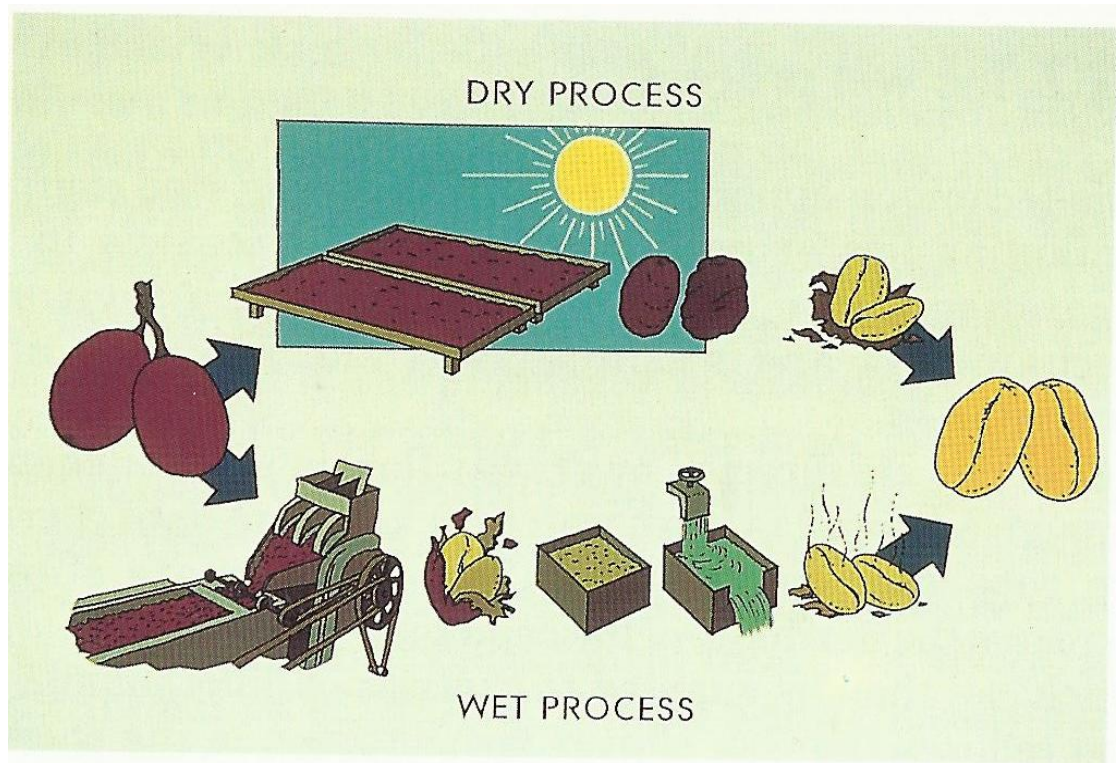
Noin 60,5 % maailman kahvintuotannosta on arabicaa ja 39,5 % robustaa [8]. Kahvikasvi vaatii runsaasti sadetta ja tasaisen lämpötilan. Arabicaa viljellään tyypillisesti vuoristossa yli 1000 m:n korkeudessa. Pavut kypsyvät korkealla hitaasti, mutta niihin kehittyy tyylikäs ja hienostunut maku, jossa on selkeät vivahteet. [1, s. 9.] Arabica on maultaan hapokas ja vivahteikas. Laji on alun perin lähtöisin Etiopiasta. Se on nimetty Arabian niemimaan mukaan, jossa ensimmäisiä viljeltyjä kahvintaimia kasvatettiin. Robusta on peräisin Kongosta ja se tyytyy vaatimattomampiin kasvuolosuhteisiin lähempänä merenpinnan tasoa. [5, s. 14.] Nimi robusta (engl. *robust*) viittaa lajin tautien ja tuholaisien kestävyYTEEN. Robustassa on tupakkamainen maku, jossa ei ole hapokkuutta. Robusta sopii tummiin kahvisekoituksiin esimerkiksi espressoon.



Kuva 3. Kahvimarjan rakenne [9].

Sato voidaan korjata koneellisesti tai käsin. Vuoristossa marjat kypsyvät eri aikaan, minkä vuoksi marjat poimitaan käsin. Koneellinen sadonkorjuu on mahdollista tasaisilla alueilla esimerkiksi Brasiliassa. Poiminnan jälkeen kahvimarjat puhdistetaan ja kuivataan ja niistä erotetaan siemenet eli kahvipavut. Marjojen prosessointiin käytetään kuiva- tai märkämenetelmää riippuen viljelmän sijainnista ja ilmasto-olosuhteista. [3, s. 39–40.]

Kuivamenetelmää (kuvan 4 yläosa) voidaan käyttää alueilla, joissa auringon valoa on riittävästi ja sade on vähäistä, jotta marjojen pitkä kuivaaminen auringossa onnistuu [1, s. 10]. Poimituista marjoista erotellaan roskat, raa'at ja ylikypsät marjat joko ilmavirran avulla tai vesialtaassa. Huonot marjat ja kasvin lehdet ovat kevyitä ja kelluvat, kun taas kypsät marjat ovat raskaita. Erottelun jälkeen marjat levitetään kuivumaan aurinkoon 2–4 viikoksi. Prosessia voidaan nopeuttaa käyttämällä mekaanista kuivuria. Kun marjojen kosteuspitoisuus on noin 12 %, papujen ympäriltä poistetaan marjan ulkoiset kerrokset (kuva 3) koneellisesti. [3, s. 41.]



Kuva 4. Kahvimarjan prosessointi kuiva- ja märkämenetelmällä [3, s. 41].

Märkämenetelmä (kuvan 4 alaosa) on kalliimpi tekniikka, mutta ”pestyjä” papuja arvostetaan enemmän. Valikoiden poimitut marjat puhdistetaan roskista ja huonoista pavuista, minkä jälkeen kuori ja hedelmäliha poistetaan mekaanisesti. Pavut siirretään fermentoitumaan 1–2 vrk:ksi vesialtasiin, joissa loppu hedelmäliha hajoaaja pergamenttikalvon päällä oleva tahmea glukoosikerrospehmenee. Fermentoinnin jälkeen pavut pestään juoksevalla vedellä, jolloin glukoosikerros irtoaa. Pavut ovat edelleen pergamenttikalvon ympäröiminä. Pavut kuivataan auringossa tai mekaanisella kuivurilla noin 12 %:n kosteuspitoisuuteen. Viimeinen vaihe prosessoinnissa on pergamenttikalvon poistaminen. [3, s. 42–45.] Sisimpänä oleva hopeakalvo poistuu viimeistään paahdon aikana palaessaan pois [1, s. 22]. Pavut luokitellaan ja lajitellaan koon, muodon ja laadun perusteella. Prosessoidut kahvipavut kuljetetaan vientiyrityksiin, josta ne myydään eteenpäin ja laivataan ostajalle.

## 4 Kahvin valmistusprosessi

Gustav Pauligilla kahvin valmistaminen alkaa raakakahvin ostamisella ja tuotannon suunnittelulla. Tuotantosuunnitelman mukaisesti eri raakakahvilaaduista tehdään kahvisekoituksia, jotka paahdetaan, jauhetaan ja pakataan kahvituoiteiksi.

### 4.1 Raakakahvi

Kahvia tuotetaan yli 60 maassa, tuotannossa on mukana yli 20 miljoonaa viljelijää ja muuta toimijaa. Noin 70 % tuottajista on pienviljelijöitä, joiden tilan koko on alle viisi hehtaaria. Gustav Paulig ostaa raakakahvia vientiyrityksiltä 10–15 maasta, yhtiön osuus maailman vuotuisesta kahvinviennistä on 0,7 % eli noin 60 miljoonaa kiloa. Raakakahvin hinta määräytyy pörssissä, mutta sen lisäksi Gustav Paulig maksaa kahvista laatulisää, jotta saataisiin yhtiön laatustandardit täyttävää kahvia. [10]

Raakakahvin ostoprosessia ohjaa ennen kaikkea laatu, mutta myös saatavuus ja hinta. Hankinnat tehdään myyntiennusteen ja tuotantosuunnitelman perusteella. Raakakahvin saatavuus vaihtelee satokausien mukaan, ja sen vuoksi hankinnan suunnittelun aikajänne on useita kuukausia. Seuraamalla varastotasoa huolehditaan siitä, että kahvisekoituksiin tarvittavat komponentit riittävät seuraavaan toimitukseen asti. [10] Esimerkiksi Juhla Mokkaan käytetään useita eri papulaatuja eli komponentteja tietyssä suhteessa.

### 4.2 Tuotannon suunnittelu

Tuotantosuunnitelma laaditaan myyntiennusteen pohjalta kampanjat ja tilaukset huomioiden. Tuotannon suunnittelulla pidetään yllä hyvää varastonkiertoa ja hallitaan tuotteiden varastotasoa. Tuotteiden lähtiessä varastolta niillä täytyy olla säilyvyysaikaa jäljellä 60–80 % (engl. *shelf-life*), mutta suurimennekkiset tuotteet lähtevät kauppoihin viikossa. Elintarviketeollisuuden aloilla kysyntä ja tarjonta eivät kulje käsi kädessä. Kullakin tuotteella on sesonkiaikansa, jonka ulkopuolella myynti on heikkoa tai olematonta. Grillimakkaraa syödään eniten kesällä, ja mämmiä myydään vain pääsiäisenä. Kahvin suosio säilyy läpi vuoden kutakuinkin samana. Suomalaiset ovatkin maailman ahkerimmin kahvia juova kansa: Suomessa kulutetaan vuodessa raakakahvia 12 kg asu-

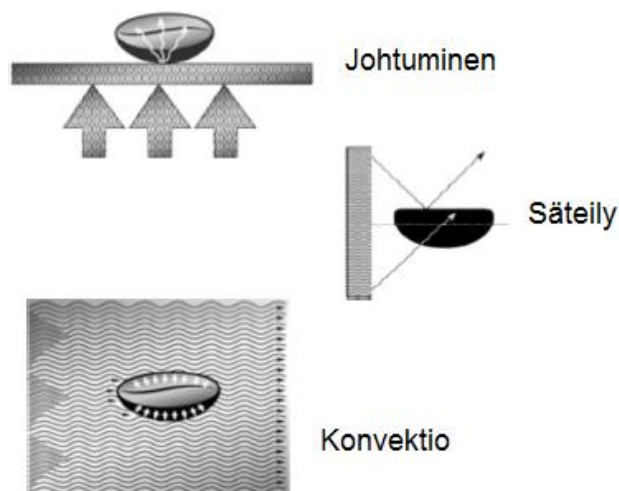


kasta kohti [11]. Kuluttajien suosiossa ovat 500 g:n vakuumpakkaukset, erityisesti Juhla Mokka- ja Presidentti-kahvit. Erikoiskahvien ja tummien kahvisekoitusten suosio on kuitenkin kasvussa.

### 4.3 Paahto

Raakakahvilaaduista valmistetaan reseptin mukainen kahviseos, jossa on keskimäärin 1–10 komponenttia. Seosta paahdetaan 5–12 minuuttia, kunnes papujen loppulämpötila on 210–235 °C. Gustav Pauligin kahvitehtaassa käytettävässä Probatin maljapaah-timessa voidaan paahtaa kerralla 500 kg kahvia, tätä kutsutaan paahtoeräksi.

Paahdettaessa kahvia papuihin siirretään energiaa johtumalla, säteilemällä ja konvek-tiolla (kuva 5). Lämmönsiirto perustuu termodynamiikan toiseen sääntöön, jonka mu-kaan energiaa virtaa suuremmasta energiatihydestä pienempään lämpötilaeron tasoit-tumiseksi. Paahtoprosessi on näiden kolmen tavan yhdistelmä. [1, s. 14.] Paahtami-seen tarvittava energiamäärä on 100–150 MJ/ 100 kg raakakahvia [3, s. 92].



Kuva 5. Lämmönsiirto johtumalla, säteilemällä ja konvektiolla [9].

Johtuminen on kontaktia kuumen pinnan kanssa. Lämpösäteily on sähkömagneettista säteilyä, jonka spektrin alueeseen kuuluvat näkyvä valo, infrapuna- ja ultraviolettisäteily. Mitä lämpimämpi kappale on, sitä voimakkaammin se säteilee infrapuna-alueella. Konvektio on lämmönsiirtoa kuumen (yli 370 °C) ilman tai nesteen virtauksen välityk-sellä. [3, s. 92.]

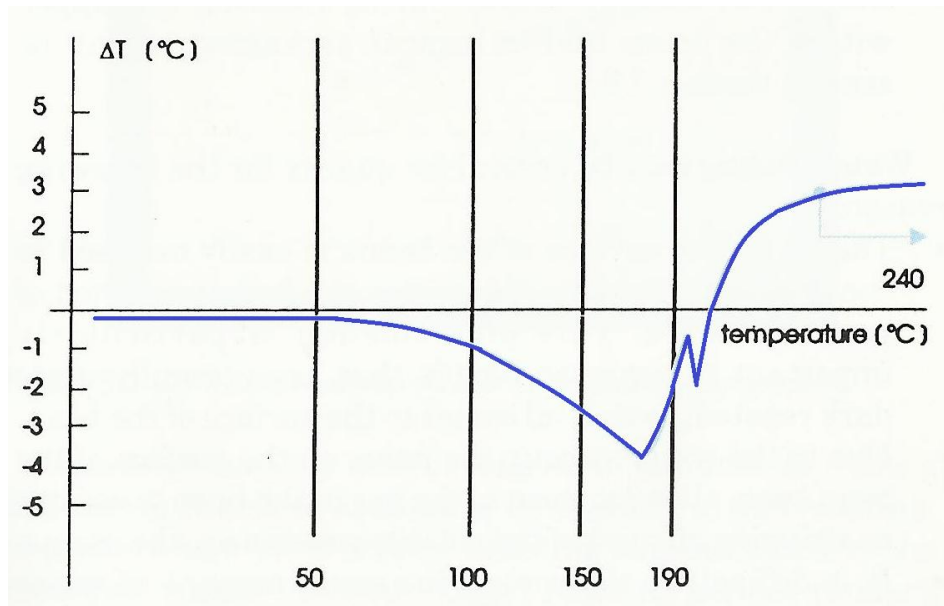
Probatin maljapaahdin on yleinen paahdinmalli teollisuusmittakaavassa. Kahvi paahdetaan donitsin muotoisessa paahtomaljassa (kuva 6), joka pyörii vaakatasossa. Maljaan syötetään noin 400-asteista ilmaa; turbulenttisen ilmavirtauksen ja keskipakoisvoiman ansiosta pavut eivät kosketa maljaa vaan leijuvat. Tällä tavoin pavut paahtuvat tasaisesti sekä erän sisällä että erästä toiseen. [3, s. 92.]



Kuva 6. Paahtomalja [9].

Paahtoprosessi voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen: kuivaukseen, paahtoon ja jäähdytykseen [3, s. 87]. Kuivauksen aikana, joka on noin puolet paahtoajasta, pavuista haihtuu kosteutta, ja niiden väri muuttuu vihreästä kellertäväksi. Pavuissa oleva vapaa vesi absorboituu paahtimeen syötettyyn kuumaan ilmaan. Höyrystyvä vesi laajenee ja nostaa painetta pavuissa. Paineennousu nostaa kiehumispistettä, jolloin vesi muuttuu jälleen nestemäiseksi. Paine kasvaa vähitellen, kunnes paahtoprosessin lopussa papujen sisällä voi olla 4 bar:n ylipaine, joka nostaa veden kiehumispisteen 150 °C:seen. [1, s. 41.]

Varsinaisessa paahtovaiheessa tapahtuu pyrolyyttisiä reaktioita, joissa syntyy paljon hiilidioksidia (5–12 L CO<sub>2</sub> /kg), ja sadat kahvin aromille ja maulle olennaiset aineet muodostuvat [3, s. 88]. Paahtoprosessissa vuorottelee endoterminen eli lämpöä sitova vaihe ja eksoterminen eli lämpöä vapauttava vaihe, katso kuva 7. Kun käyrä kulkee alaspäin, kyseessä on endoterminen vaihe, joka vaatii ulkoisen energian lähteen. Ylöspäin kulkeva käyrä on eksoterminen. Kun reaktio muuttuu endotermiseksi, pavut halkeavat kuten popcorn. Ensimmäisen halkeaminen tapahtuu 160 °C:ssa, kun vesihöyry vapautuu. Toinen halkeaminen johtuu hiilidioksidin purkautumisesta noin 210 °C:ssa. Englanniksi termit ovat *first crack* ja *second crack*. [1, s. 27; 3, s. 88–89.]



Kuva 7. Paahtoprosessin kalorimetrinen käyrä [3, s. 89].

Paahtoprosessin viimeinen vaihe on eksotermiäinen: kahvi luovuttaa lämpöä ja jatkaa paahtumista hiljalleen ilman ulkoista lämmönlähdettä. Jotta paahtotulos olisi tasainen ja toistettava, papujen paahtuminen pysäytetään suihkuttamalla paahtomaljaan vettä. Pavut luovuttavat vedelle höyrystymiseen tarvittavan energiamäärän, ja kahvin lämpötila laskee. Vesisuihkun jälkeen paahtomalja avautuu, ja pavut lingotaan maljan reunan yli jäähdysritilälle, jossa kahvi jäähdytetään ilmavirran avulla. Tämän jälkeen pavut siirretään paahtetun kahvin siiloon. Ennen kuin kahvipavut jauhetaan, niiden täytyy stabiloitua 2–4 h. Stabiloitumisaikan tarkoituksena on antaa kosteuden tasoittua kahvipavuissa. [1, s. 15–16; 3, s. 89.]

#### 4.3.1 Fysikaaliset muutokset

Kahvipapu muistuttaa ellipsoidia eli ellipsin pyörähdyskappaletta, jonka toinen puoli on litteä. Rakenteeltaan papu on kuin huokoinen pesusieni, joka koostuu noin miljoonasta solusta. Papuun syntyy hiilidioksidia ja vesihöyryä, jotka laajetessaan aiheuttavat huomattavan ylipaineen, ja saavat pavun paisumaan lähes kaksinkertaiseksi. Mikrohuokokset suurenevat, soluseinät ohenevat, ja papu muuttuu hauraammaksi. Kun paine pavussa kasvaa tarpeeksi suureksi, kaasut pyrkivät poistumaan. [1, s. 23–27, 30.]

Pavun tilavuus kasvaa, samalla kun sen paino pienenee. Paahtamisen aikana pavusta irtaantuu hopeakalvo, haihtuu vettä, vapautuu kaasuja ja helposti haihtuvia orgaanisia yhdis-

teitä (engl. *volatile organic compounds*). Raakakahvin kosteuspitoisuus on 8–12 %, paahdon aikana kosteuspitoisuus laskee 0–5%:iin [3, s. 99]. Karkeasti arvioiden 70 % painohävikistä on vettä ja 30 % hiilidioksidia [3, s. 101]. Kokonaisuudessaan veden ja kaasujen vapautuminen aiheuttaa 12–23 % painohävikin [1, s. 34].

Pavun väri muuttuu vihreästä kellertäväksi noin 130 °C:ssa [1, s. 28]. Keltaisesta tulee kanelinvärinen hento vaaleanruskea, kuten kuvan 8 numero 4. Kohdissa 5–12 näkyy, kuinka ruskea väri syvenee paahdon edetessä, kunnes lopulta noin 220 °C:ssa papu on musta ja hiiltynyt, lähellä syttymispistettä. [3, s. 88.]



Kuva 8. Pavun värinmuutos paahdon aikana [9].

Kahvin hikoilulla tarkoitetaan pavun sisältä siirtyvän kahvirasvan pisarointia pavun ulkopinnalla. Kuvan 8 kohdista 14–16 näkyy, että ilmiö on tunnusomainen erityisesti tummaksi paahdetuilla pavuilla, joiden pinta on kiiltävän öljyinen ja rasvaisen tuntuinen. [1, s. 45.]



#### 4.3.2 Kemialliset muutokset

Paahdon aikana kahvipapuun muodostuu lähes tuhat yhdistettä vain muutamasta lähtöaineesta. Suurin osa on helposti haihtuvia aromaattisia yhdisteitä, jotka antavat kahville sen tunnusomaisen maun ja aromin. [1, s. 46.] Taulukossa 1 on vertailtu raakakahvin ja paahdetun kahvin kemiallista koostumusta kahvilajeittain.

Taulukko 1. Raakakahvin ja paahdetun kahvin kemiallinen koostumus [3, s. 98].

	Raakakahvi (% kuiva-aineesta)		Paahdettu kahvi (% kuiva-aineesta)	
	Arabica	Robusta	Arabica	Robusta
Polysakkaridit	49,8	54,4	38,0	42,0
Lipidit	16,2	10,0	17,0	11,0
Proteiinit	9,8	9,5	7,5	7,5
Klorogeenihapot	6,5	10,0	2,5	3,8
Kivennäisaineet	4,2	4,4	4,5	4,7
Kofeiini	1,2	2,2	1,3	2,4
Trigonelliini	1,0	0,7	1,0	0,7
Muut aineet	11,3	8,8	28,2	27,9

Raakakahvissa noin 50 % on polysakkarideja, pitkiä monosakkarideista koostuvia polymeerejä. Paahdon aikana osa polysakkarideista hajoaa ja muuttuu toiseen muotoon. [12, s. 7.] Maillardin reaktiossa polysakkaridit reagoivat proteiinien aminoryhmien kanssa tuottaen melanoideja, jotka antavat kahville sen ruskean värin. [1, s. 48; 3, s. 106.] Lipidit ovat toiseksi suurin ryhmä, ne ovat orgaanisia veteen liukenemattomia molekyyliä. Suurin osa lipideistä on pavun sisällä, vain yksi prosentti on pavun pinnalla. [12, s. 19.] Hiilidioksidi suojaa kahvin solukoissa olevia lipidejä hapettumiselta. Paahdamisen aikana pavun solurakenne rikkoutuu. Mitä tummemmaksi kahvi paahdetaan, sitä enemmän pavun soluja hajoaa ja rasvaa vapautuu. Pinnalle siirtyvä rasva on alttiina hapettumiselle, jolloin kahvi pilaantuu helpommin. [3, s. 111.] Suodatinkahvia valmistettaessa lipidit jäävät suodatinpaperiin, pannukahvi sisältää siis enemmän rasvaa kuin suodatinkahvi. Kolmanneksi eniten on kahvissa proteiineja ja aminohappoja, jotka osallistuvat Maillardin reaktioon. Suuri osa aminohapoista ja proteiineista hajoaa paahdettaessa. [12, s.12.]

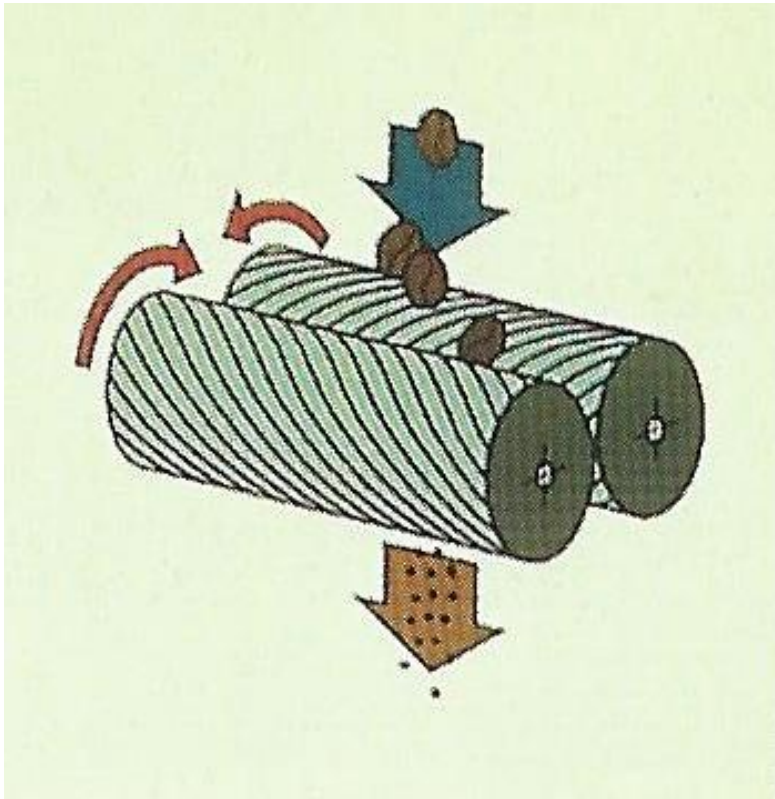
Klorogeenihapot ovat fenolisia, vesiliukoisia karboksyylihappoja. Klorogeenihapot ja sen paahdossa muodostuvat hajoamistuotteet, kahvihappo ja kiniinihappo, ovat antioksidanttisia. [12, s. 10.] Kahvi sisältää monia kivennäisaineita muun muassa fosforia, kaliumia, kalsiumia, klooria, magnesiumia, natriumia, rautaa ja rikkiä sekä hivenaineita kuten bromia, fluoria, kuparia, mangaania, molybdeenä ja sinkkiä. Kivennäis- ja hivenaineet eivät muutu paahtamisen aikana. [12, s. 11.] Kofeiini ja trigonelliini ovat alkalioideja eli emäksisiä, typpipitoisia orgaanisia yhdisteitä, joita löytyy luonnosta. Kofeiini on puriinialkaloidi, emäs, jolla on kaksoisrengasrakenne. Kofeiini vaikuttaa kiihdyttävästi keskushermostoon ja aineenvaihduntaan. Robustassa on kaksinkertainen määrä kofeiinia verrattuna arabicaan. Kupillisessa (1,25 dl) suodatinkahvia on 100–175 mg kofeiinia. Trigonelliini on pyridiinialkaloidi, jossa on tyypeä sisältävä aromaattinen rengas. Osa trigonelliisista hajoaa paahton aikana nikotiinihapoksi eli B<sub>3</sub>-vitamiiniksi. Trigonelliini ja kofeiini vaikuttavat kahvin karvaaseen makuun. [12, s. 14–15, 18–19.]

#### 4.4 Jauhaminen

Kahvipavut jauhetaan mahdollisimman suuren uuttopinta-alan saamiseksi [3, s. 121]. Jauhatusaste valitaan valmistusmenetelmän mukaan riippuen siitä, kuinka pitkä veden ja kahvin välinen kontaktiaika on. Jauhatusasteet voidaan jakaa esimerkiksi erittäin hienoon, hienoon, puolikarkeaan ja karkeaan jauhatukseen. Espresso valmistettaessa käytetään erittäin hienoksi jauhettua kahvia, vesi puristetaan kahvin läpi 8 bar:n paineella 25–30 sekunnissa. Pannukahvia taas haudutetaan 4–5 minuuttia, ja siihen käytetään puolikarkeaa kahvia. Liian hienon jauhatuksen käyttäminen saattaa tukkia suodatinpaperin huokokset. ”Kahvijauhekakku” voi myös paakkuuntua reunoilta ja sisäosaan ei pääse ollenkaan vettä. Käyttämällä liian karkeaa kahvijauhetta tai liian viileää vettä saadaan laihaa kahvia.

Termillä jauhaminen voidaan tarkoittaa puristavaa tai leikkaavaa voimaa, joka kohdistuu pienennettävään kohteeseen. Kahvin jauhamisessa on kyse leikkaamisesta. Jauhetun kahvin partikkelit eivät ole samankokoisia: osa on isompia ja osa pienempiä kuten hiekkalaatikossa. [3, s. 121–122.] Partikkelikokojakauma kertoo, kuinka karkeaa tai hienoa jauhe on. Gustav Pauligin kahvitehtaan partikkelianalysaattorilla määritettäessä partikkelit jaetaan viiteen kokoluokkaan, joista karkein on yli 1,000 µm ja hienoin alle 0,315 µm. Esimerkiksi espressojauheessa noin 80 % partikkeleista on alle 0,500 µm.

Teollisuusmittakaavassa jauhamiseen käytetään valssimyllyä, jossa on kolme valssiparia. Yhdessä valssiparissa (kuva 9) on kaksi vaakatasossa, vastakkaisiin suuntiin pyörivää telaa. Telojen väliin jäävää aukkoa säättämällä voidaan vaikuttaa jauheen karkeuteen. Valssiparit ovat myllyssä kolmion muotoisesti: esimurskauksen tekevä pari on ylhäällä ja kaksi hienontavaa valssiparia ovat sen alapuolella. Probatin valssimyllyllä voidaan jauhaa noin 4000 kg kahvia tunnissa. [3, s. 125, 126, 129.]



Kuva 9. Myllyn valssipari [3, s.126].

#### 4.5 Kaasuuntuminen

Jauhettua kahvia pidetään kaasuuntumissiiloissa 1–30 h ajan ennen pakkaamista, vaihtetta kutsutaan kaasuuntumisajaksi. Aihetta käsitellään tarkemmin osiossa 5.

#### 4.6 Pakkaaminen

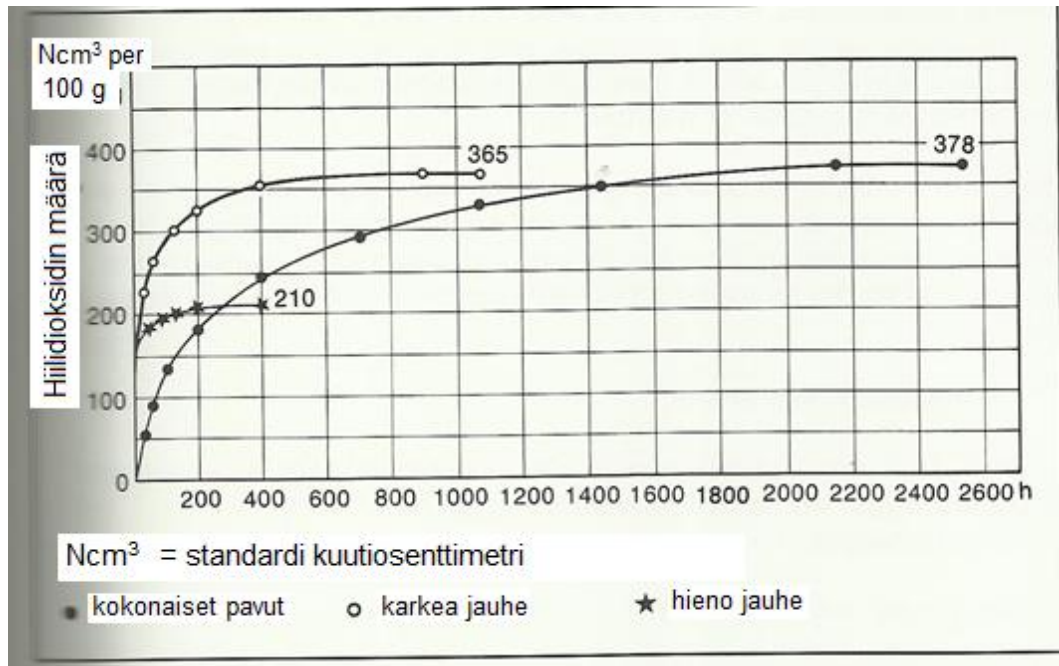
Paahdettu kahvi vanhenee ja väljähtyy helposti. Kahvin pilaajia ovat happi, kosteus, valo ja lämpö. Kahvi myös imee itseensä herkästi muita hajuja. [3, s. 134–136.] Pakkausmateriaalin on suojattava kahvia edellä mainituilta asioilta sekä oltava kemiallisesti inertti ja kestettävä paineenvaihteluita [3, s. 143].

Suurimennekkiset tuotteet, kuten Juhla Mokka ja Presidentti, pakataan muun muassa 500 g:n vakuumpakkaukseen. Laminaatista muotoillaan aihio, johon kahvi pakataan, ilma poistetaan ja pakkaus saumataan. Pakkausmateriaalin on oltava kaasutiivis. Jauhetut kahvit voidaan pakata myös erikokoisiin (100–1000 g) suojakaasupusseihin, joissa normaali ilmakehän koostumus on korvattu N<sub>2</sub>-kaasulla. Typpi syrjäyttää hapen, ja kemiallisesti inerttinä aineena se ei reagoi muiden aineiden kanssa normaaliolosuhteissa. Suojakaasuna voidaan käyttää hiilidioksidia, typpeä tai hiilidioksidin ja typen seosta. Kokonaisina papuina myytävät kahvit pakataan suojakaasupakkaukseen, jossa on venttiili. Venttiili päästää hiilidioksidin ulos, mutta ei päästä happea sisään. Avattomassa paketissa kahvin aromit säilyvät kuukausia. Avattu paketti taas olisi hyvä käyttää viikon kuluessa.

## 5 Kaasuuntumiseen vaikuttavat tekijät

Paahdossa papuun syntyy valtavasti hiilidioksidia, joka sitoutuu solurakenteeseen. Kaasua vapautuu diffuusiolla, kunnes uusi tasapainotila ympäristön kanssa on saavutettu. Vapautuminen on hidasta, koska pavun ulkopinta on suhteellisen pieni ja diffuntoituva kaasu joutuu kulkemaan pitkän matkan. [1, s. 66.] Monet tekijät vaikuttavat kahvin kaasuuntumisen voimakkuuteen eli vapautuvan hiilidioksidin määrään ja vapautumisnopeuteen. Kahta kahvilajia verrattaessa robusta muodostaa enemmän hiilidioksidia kuin arabica. Kahvisekoitukset, joissa on robustaa, kaasuuntuvat siis kauemmin kuin arabicaa sisältävät sekoitukset. Tummaski paahdettuihin papuihin syntyy paahtoprosessissa enemmän hiilidioksidia kuin vaaleapaahtoisiin papuihin. Mitä tummempiki kahvi on paahdettu, sitä pidempi kaasuuntumisaika on. [2, s. 224.] Hiilidioksidia vapautuu kahvin paahtoasteesta riippuen arviolta 6–10 L CO<sub>2</sub>/kg [3, s. 141]. Kenties merkittävin kaasuuntumiseen vaikuttava tekijä on kahvin jauhatustaso: solurakenteen murskaaminen mahdollistaa huokosiin sitoutuneen hiilidioksidin poistumisen, ja moninkertaistunut pinta-ala nopeuttaa kaasun vapautumista. Mitä hienommaksi kahvi jauheetaan, sitä nopeammin se kaasuuntuu. Suurin osa hiilidioksidista vapautuu jo jauhatuksessa. [1, s. 66; 2, s. 225; 3, s. 142.]

Kuvassa 10 on vertailtu hiilidioksidin vapautumisnopeutta kolmessa tapauksessa. Vuorokauden kuluttua paahtamisesta hiilidioksidia on vapautunut kokonaisista pavuista noin 15 %, karkeasta jauhatuksesta 60 % ja hienosta jauheesta 80 %. Kuvan perusteella kaikki hiilidioksidi (100 %) on vapautunut kokonaisista pavuista 2850 h:n eli lähes 4 kuukauden kuluttua, karkeasta jauheesta 1000 h:n jälkeen ja hienosta jauheesta 400 h:n jälkeen. [2, s. 225.]



Kuva 10. Hiilidioksidin vapautuminen kokonaisista pavuista, karkeasta ja hienosta kahvijauheesta [2, s. 225].

Raskaana kaasuna hiilidioksidi estää ilman hapen tunkeutumisen papuun ja suojelee kahvia hapettumisen väljähdtyvältä vaikutukselta. Toisaalta se hankaloittaa pakkaamista muodostamalla pakkauksen sisään painetta. [3, s. 142.] On myös todettu, että hiilidioksidin mukana kahvista haihtuu aromaattisia yhdisteitä, joilla on suuri merkitys kahvin makuun ja tuoksuun. [13, s. 279, 282, 285.] Parhaan laadun takaamiseksi kahvi on siis pakattava mitä pikimmiten, mutta riittämätön kaasuuntumisaika hankaloittaa pakkaamista ja varastointia aiheuttamalla vakuumpaketin pehmenemisen ja suojakaasupakkauksen pullistumisen.

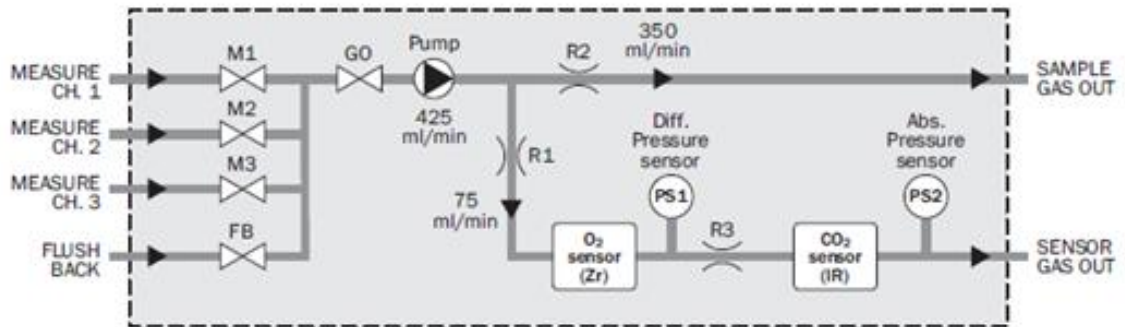
### 5.1 Kaasuuntumisajan määrittäminen

Kahvin kaasuuntumisaikaa pidetään yhtenä valmistusprosessin pullonkaulana, joka pitkittää tuotannon kestoa ja saattaa aiheuttaa tuotantokatkoksia, kun pakkaamisen aloittamista joudutaan odottamaan. Se on myös haaste tuotannonsuunnittelulle. [14] Seuraavassa kappaleessa esitellään Gustav Pauligin kahvituotteiden nykyisten kaasuuntumisaikojen määrittäminen.

Gustav Pauligin kahvitehtaan laboratoriossa on käytössä Anagas CD 98 Incubator Analyzer, joka mittaa CO<sub>2</sub>-pitoisuutta. Kannettava, matkapuhelimen kokoinen analysaattori mittaa ympäröivän kaasutilan koostumusta. Ennen mittausta laite kalibroidaan käyttäen 100 % N<sub>2</sub>-kaasua. 1000 g vastajauhettua, tutkittavaa kahvia laitetaan analysaattorin kanssa pieneen ilmatiiviiseen kaappiin. Mittaus kestää noin 40 h. Tuloksia tarkastellaan tietokoneella. Hiilidioksidilukeman maksimiarvo kertoo, millä ajanhetkellä kahvi on vapauttanut 100 % hiilidioksidista. Maksimiarvon perusteella voidaan laskea kyseiselle tuotteelle optimaalinen kaasuuntumisaika eli ajanhetki, joka vastaa 50–60 % hiilidioksidipitoisuuden maksimiarvosta. Lopuksi mittaustuloksen luotettavuus varmistetaan pakkauskokeella. Tutkittavaa kahvia pakataan eri kaasuuntumisaajoilla (esimerkiksi 2 h; 2,5 h; 3 h; 3,5 h), ja pakkauseriä seurataan useiden kuukausien ajan mittaamalla kahvin kaasunvapautusta eli paketin vakuumiarvoa. Mitä enemmän hiilidioksidia pakkaukseen syntyy, sitä pienempi vakuumi on. Pakkauskoneelta lähtiessään paketissa on alipainetta noin 900 mbar. Muutamassa vuorokaudessa vakuumi laskee noin puoleen. Tuotteen elinkaaren aikana vakuumiarvo ei saa laskea 200 mbar:n alle. Pakkauskokeella määritetään siis kaasuuntumisaika, jolla kahvipaketin vakuumi säilyy useita kuukausia raja-arvon yläpuolella. [15]

## 5.2 Map Check 3 -analysaattori

Map Check 3 on tanskalaisen Dansensorin valmistama kaasuntunnistusanalysaattori, joka mittaa O<sub>2</sub>- ja CO<sub>2</sub>-pitoisuuksia. Laite on kannettava, tulostimen kokoinen ja painaa 10 kg. Kuva 11 havainnollistaa analysaattorin toimintaperiaatetta. Pumppu imee näyteilmaa 425 ml/min vuorotellen kolmesta mittauskanavasta. Zirkonia-anturi ei mittaa hapen konsentraatiota, vaan näyteilman ja ilmakehän hapen määrän erotusta, josta aiheutuu tietynsuuruinen jännite. Hiilidioksidia mitataan spektrofotometrisesti infrapuna-anturilla (NDIR). Anturi mittaa kaasujen pitoisuudet prosentteina vallitsevasta ilmakehästä. Mittausletkuna käytetään muoviletkua, jonka halkaisija on 2,5 mm. Letkun päässä on suodatin (engl. *sample gas filter*) analysaattorin tukkeutumisen estämiseksi.



Kuva 11. Analysaattorin O<sub>2</sub>- ja CO<sub>2</sub>-anturien toimintaperiaate [16].

Analysaattorissa on kolme mittauskanavaa (engl. *measure channel*), joten näytteenotopäät on mahdollista sijoittaa kolmeen eri kaasuuntumissiiloon. Mittaus on luonteeltaan jaksottaista, kerrallaan mitataan yhtä kanavaa, jolloin muiden kanavien venttiilit ovat suljettuina (kuva 11). Kullekin kanavalle on määritetty mittausaika, jonka jälkeen siirrytään mittaamaan seuraavaa kanavaa. Kanavanvaihdon yhteydessä mittauslukema heittelehtii, vaikutus minimoidaan mittausviiveellä, jonka aikana lukemia ei tallenneta. Yksi mittaus sykli koostuu kunkin kanavan mittausviiveestä ja -ajasta. Tämän insinööri-työn mittauksissa käytetty mittaus sykli oli 1 min, jonka aikana mitattiin O<sub>2</sub>- ja CO<sub>2</sub>-pitoisuutta kustakin kanavasta 10 s ajan ja jokaisen kanavanvaihdon jälkeen oli 10 s:n mittausviive.

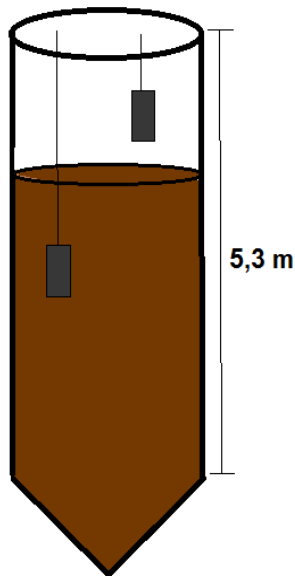
Mittaus on jatkuvasti käynnissä eikä se tarvitse välitöntä valvontaa. Mittaustulokset tallentuvat laitteen muistiin, josta ne aika ajoin tyhjennetään muistitikulle. Mittaustulosten tallentaminen pysähtyy, jos laitteen muisti on täynnä, näytteenotossa on tukos tai ilmaantuu jokin muu vikailmoitus.

Mittaustietoja voidaan käsitellä esimerkiksi Excelillä. Työn helpottamiseksi päätettiin käyttää R-nimistä tilasto-ohjelmaa. Datan käsittelyä varten työn ohjaaja Veli-Matti Taavitsainen loi komentotiedoston, joka poisti aineistosta poikkeavat arvot, järjesti kunkin kanavan mittaustulokset omiksi taulukoikseen ja piirsi kuvan 14 kaltaisen kuvaajan. Kuvaajasta voidaan poimia yksittäinen käyrä, piirtää se erikseen ja tallentaa se omaksi tiedostokseen myöhempää tarkastelua varten.



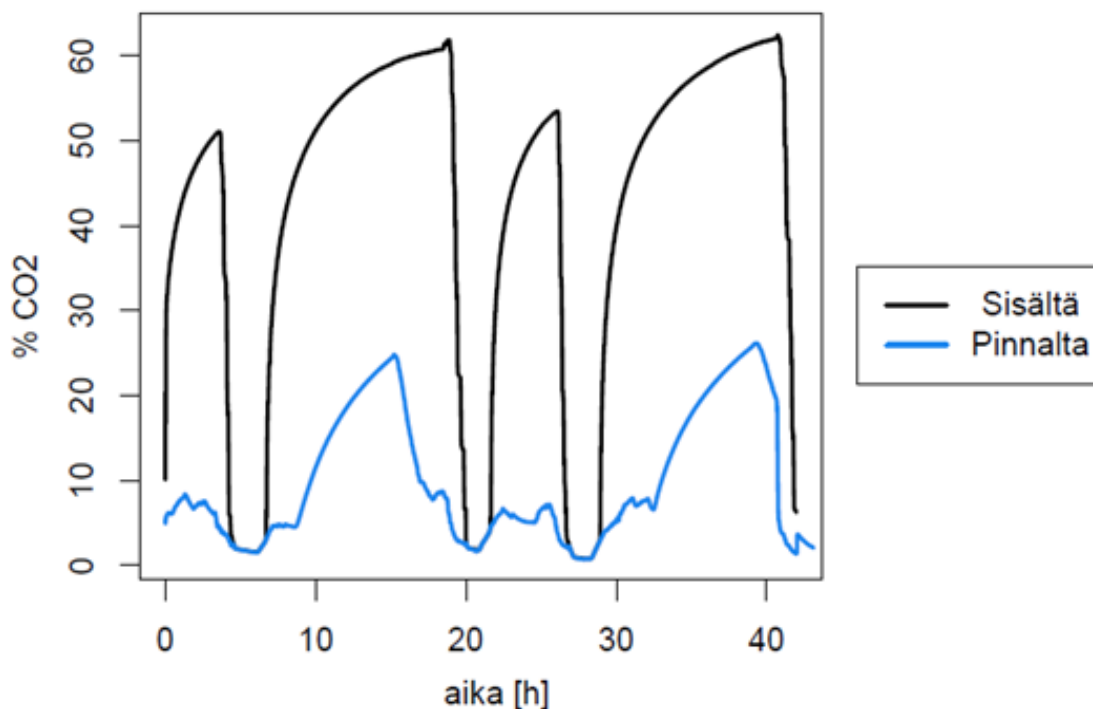
### 5.3 Kaasuuntumismittaukset

Gustav Pauligin kahvitehtaalla kaasuuntumissiilot sijaitsevat jauhatustilassa. Siiloja on yhteensä 45 kpl, ja niitä on kahdenkokoisia: kapasiteetiltaan 2000 kg tai 4000 kg. Kaasuuntumissiilot ovat noin 6 m korkeita ympyrälieriöitä, joiden alaosa on kartion muotoinen (kuva 12). Siilon täyttö tapahtuu ylhäältä ja tyhjennys alhaalta.



Kuva 12. Mittauskorkeuden vaikutuksen määrittäminen. Kaksi näytteenottopäätä on sijoitettu samaan kaasuuntumissiiloon eri korkeuksille.

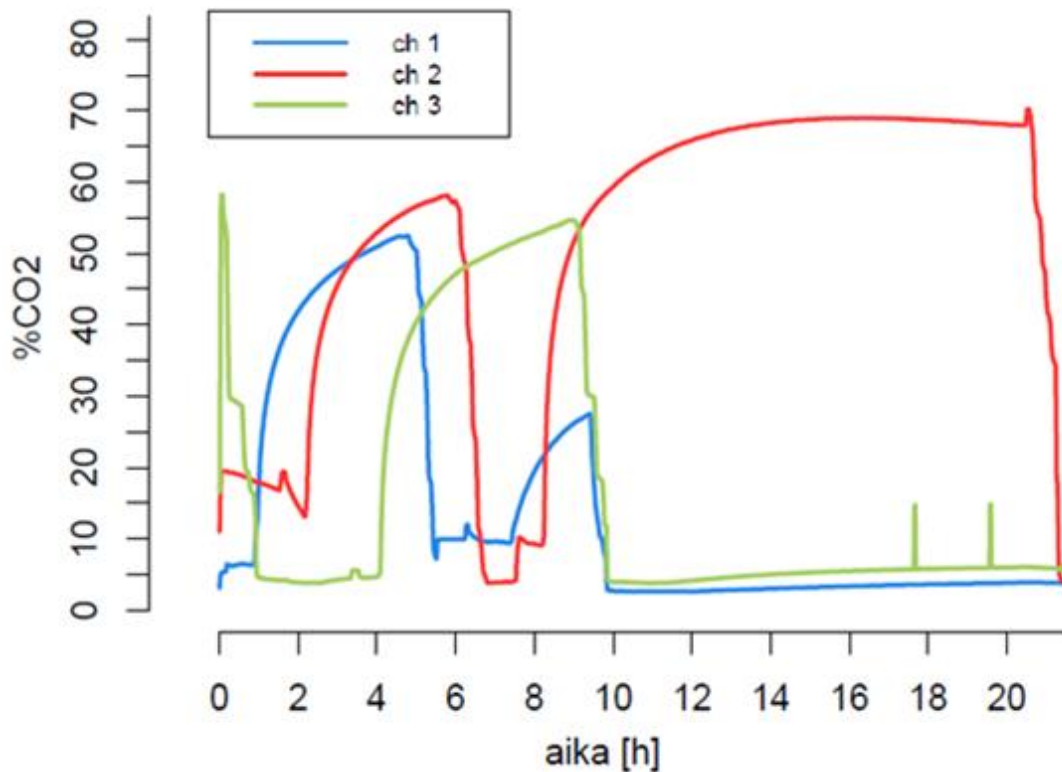
Työn kokeellinen osuus aloitettiin testaamalla laitteen ja mittauksen toimivuutta. Laitteen käyttö oli suoraviivaista, ja mittauksista saatiin järkevältä tuntuvia tuloksia. Mittaus oli käynnissä yötä päivää, joten kaasuuntumissiilon pölyiset olosuhteet tukkivat letkun ja suodattimen aika ajoin. Päivittäin oli tarkistettava, että mittaus ei ollut pysähtynyt. Seuraavaksi tutkittiin, mikä olisi paras mittaustapa, ja miten mittauskorkeus eli imupään sijainti siilossa vaikuttaa tuloksiin. Aikaisemmissa mittauksissa vastaavalla analysointilaitteella näytteenottopää oli ollut noin puoli metriä kahvin pinnan yläpuolella [14]. Oletettiin, että mittaus kahvin sisältä antaisi erilaisia tuloksia. Asian selvittämiseksi samaan siiloon asennettiin kaksi imupäätä kuvan 12 mallin mukaisesti: toinen kahvin pinnan yläpuolelle ja toinen kahvimassan sisälle.



Kuva 13. Mittaustapojen vertailu. Musta viiva kuvaa tilannetta kahvin sisällä ja sininen viiva on kahvin pinnalta mitattu hiilidioksidipitoisuus.

Kuvasta 13 nähdään, miten suuri vaikutus mittauskorkeudella on havaitun hiilidioksidikaasun määrään.  $\text{CO}_2$  on ilmaa raskaampaa kaasuna siilon pohjalla, se ei kohoja ylöspäin kuten esimerkiksi tulipalokaasut. Jos kahvimassan pinta on kalteva tai alhainen siilon ollessa vajaa, anturi ei havaitse kaikkea siilossa olevaa hiilidioksidia. Pinnalla olevan imupään tuloksista piirretty sininen viiva muistuttaa paikoin mittauskohinaa. Siitä ei voida tarkasti määrittää kaasuuntumisen alku- ja loppuhetkeä, kun taas kahvin sisältä mitatussa mustassa viivassa näkyvät selkeästi neljä eri kaasuuntumisajoa eli kaasuuntuvaa kahvierää. Huomataan, että pinnalta mitatuissa tuloksissa näkyy pieni viive kuten oletettiin. Näiden kokeiden perusteella voidaan päätellä, että mittaus kahvin sisältä antaa luotettavampia tuloksia kuin pinnalta mitattuna. Näin voidaan myös minimoida kahvin pinnan kaltevuuden ja kaasuuntumissiilon täyttöasteen vaikutukset. Näytteenottopäät sijoitettiin siilojen puoliväliin noin 3 m:n päähän siilon katosta (kuva 12). Todettakoon, että tulososiossa esitetyt mittaus tuloksista piirretyt kuvat ovat tilannekohtaisia, jotka on valittu havainnollistamaan kyseistä tapausta, eikä voi tehdä yleisesti päteviä johtopäätöksiä. Tekstissä käytetyt hiilidioksidipitoisuuksien lukuarvot on määritetty suurimman mittausarvon kohdalta graafisesti arvioimalla tarvittaessa ekstrapoloiden.

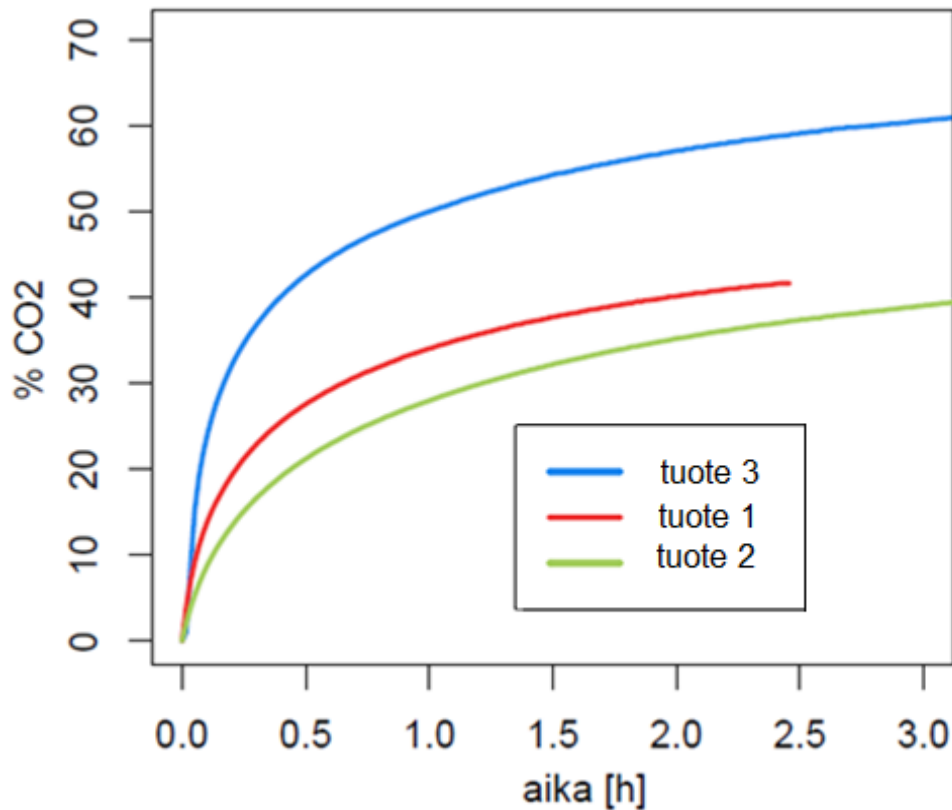
## 6 Tulokset



Kuva 14. Hiilidioksidipitoisuuden mittaustulokset kolmesta siilosta 24 h:n ajalta.

Kuva 14 on esimerkkikuva Map Check 3 -analysointilaitteella saaduista mittaustuloksista. Kunkin mittauskanavan eli siilon tulokset ovat merkitty omalla värillään. Kuvassa yksi käyrä vastaa yhtä kaasuuntumisajoa. Hiilidioksidilukema heittelee, kun kahvin jauhaaminen aloitetaan eli kaasuuntumissiiloa täytetään. Kun siilo on täynnä, hiilidioksidipitoisuus alkaa nousta, ja kaasuuntumisajan laskeminen aloitetaan. Kaasuuntumisajan loputtua siilo tyhjenetään ja kahvin pakkaaminen aloitetaan, mikä näkyy äkillisenä pudotuksena hiilidioksidin pitoisuudessa. Hiilidioksidin nollassa eli CO<sub>2</sub>:n pitoisuus siilon ollessa tyhjä on noin 0–15 %. Kuvasta 14 huomataan, että nollassa vaihtelee kaasuuntumisajojen välillä. Suurelle vaihtelulle ei ole selkeää syytä. Siilot saattavat vuotaa, kahvissa tapahtuu odottamattomia reaktioita tai vaihtelu saattaa johtua tuntemattomien tekijöiden yhteisvaikutuksesta. Tulosten tarkastelussa vaikutus minimoitiin asettamalla käyrille sama lähtötaso. Huomattiin, että näytteenottopään ollessa lähempänä pohjaa nollassa lukemat olivat korkeampia. Mitä syvemmällä imupää oli, sitä todennäköisemmin mittaus pysähtyi. Luultavasti siilon täyttövaiheessa kahvin sisään jäänyt letku vääntyi solmuun, mikä esti näyteilman virtauksen.

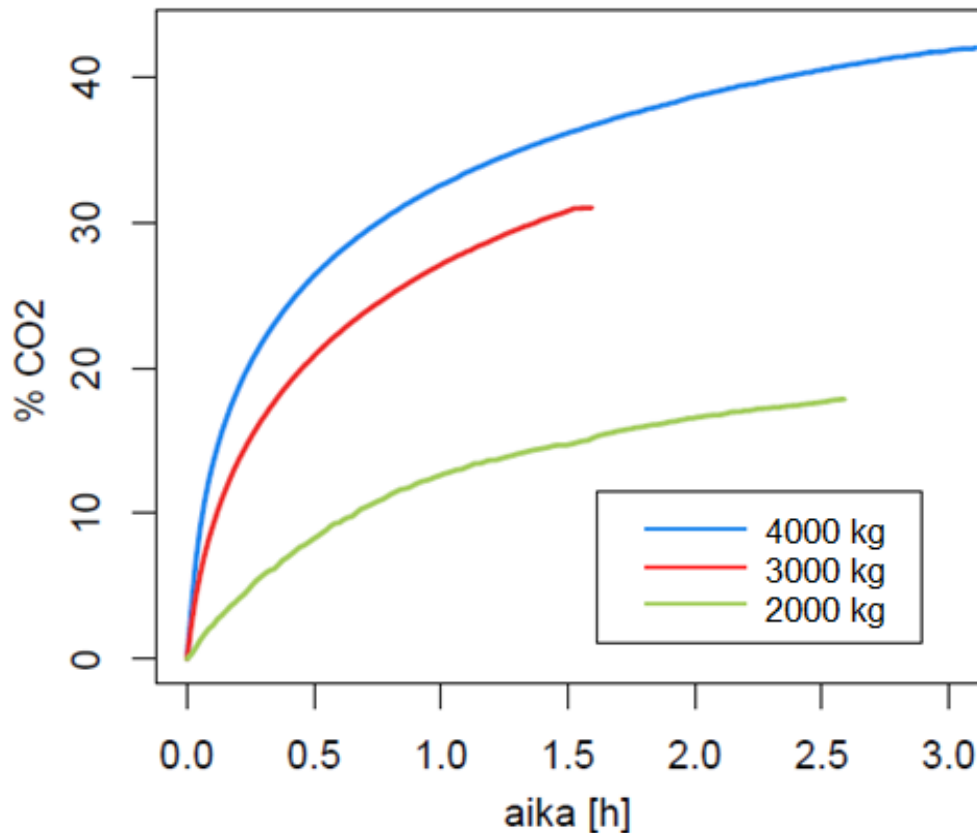
## Paahtoasteen ja jauhatuksen vaikutus kaasuuntumiseen



Kuva 15. Paahtoasteen ja jauhatuksen vaikutus. Tuotteet 1 ja 2 ovat vaaleita kahveja, joista ensin mainittu on hienommaksi jauhettu, tuote 3 on tumma kahvisekoitus.

Paahtoasteen ja jauhatuksen vaikutusta havainnollistetaan kuvassa 15, johon on selkeyden vuoksi valittu vain yksi käyrä kustakin tuotteesta. Tarkastelussa ovat vaalean arabican erikoishieno- ja puolikarkeajauhatus sekä tumma kahvisekoitus. Kahvin kaasuuntumisen teorian mukaan tummaksi paahdettu kahvi kaasuuntuu enemmän kuin vaaleapaahtoinen kahvi, ja hienosta kahvijauheesta vapautuu enemmän hiilidioksidia kuin karkeasta kahvista. Kuvasta huomataan, että hienempi kahvi kaasuuntuu karkeampaa voimakkaammin: käyrä on jyrkempi ja hiilidioksidipitoisuus on noin 5 prosenttiyksikköä suurempi. Tumman kahvin hiilidioksidipitoisuus on noin 60 %, kun taas vaaleilla kahveilla lukemat jäävät 35–40 %:n välille. Voidaan todeta, että tässä tapauksessa tumman kahvin hiilidioksidipitoisuus on noin 50 % suurempi kuin vaalean, ja että vaalean kahvin erikoishienolla ja puolikarkealla jauheella on noin 5 prosenttiyksikön ero. Tämänkaltaisten tulosten perusteella voidaan osoittaa, että tumma ja hienoksi jauhettu kahvi kaasuuntuu voimakkaammin kuin vaalea, karkea kahvi.

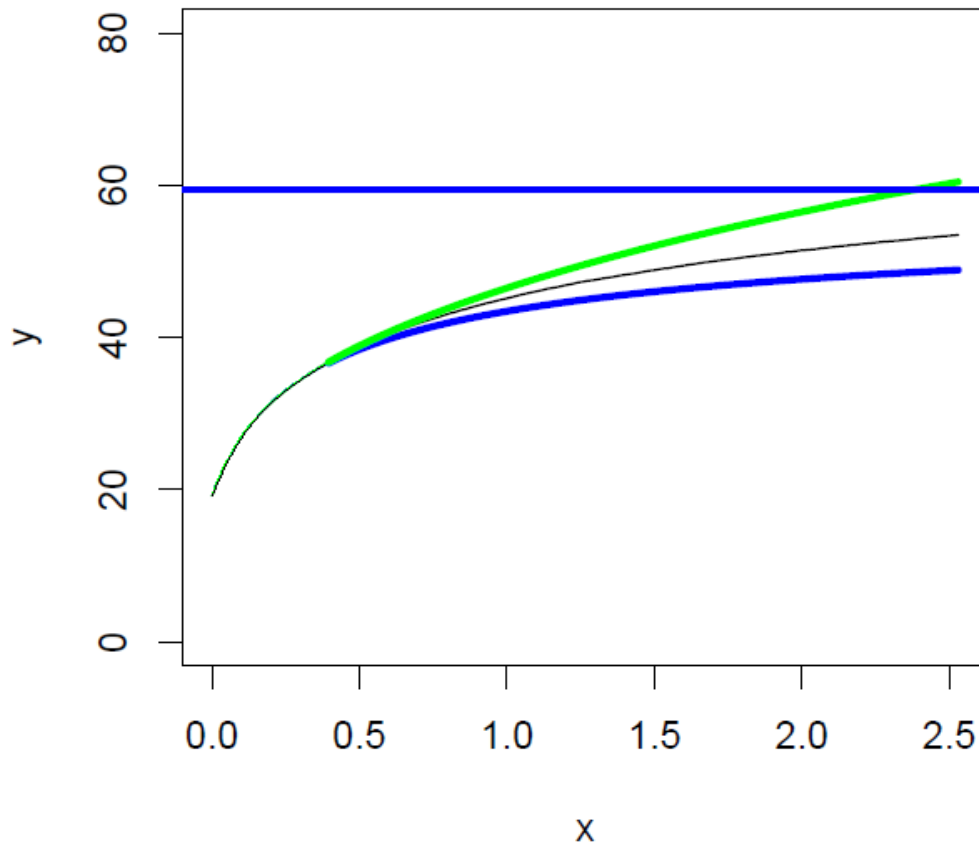
## Kaasuuntumiserän koon vaikutus



Kuva 16. Erän koon vaikutus kaasuuntumiseen. Vertaillaan tuotteen 1 kolmea erikokoista kaasuuntumiserää.

Kuvan 14 kaltaisesta mittauksen yleiskatsauksesta on mahdollista arvioida kaasuuntumiserän kokoa silmämääräisesti. Erät ovat yleensä 1000–4000 kg. Edellisessä kappaleessa todettiin, että myös tummat kahvisekoitukset erottaa mittausaineistosta helposti korkean hiilidioksidipitoisuuden vuoksi. Kuvassa 16 on vertailtu kolmea erikokoista erää, jotka ovat samaa tuotetta ja kaasuuntuneet samassa siilossa. Käyrät ovat siinä järjestyksessä kuin voisi olettaakin. Välit eivät kuitenkaan ole tasaiset. 4000 ja 3000 kg:n välillä on noin 10 prosenttiyksikön ero; 3000 ja 2000 kg:n välinen pitoisuusero on noin 15 prosenttiyksikköä. Siilossa olevan kahvin määrä siis näyttää korreloivan siilon hiilidioksidipitoisuuden kanssa. Toki poikkeuksiakin löytyi. Kuvan 16 perusteella voitaisiin ajatella, että 2000 kg:lle kahvia riittäisi lyhyempi kaasuuntumisaika kuin 4000 kg:lle. Tosin vajaassa siilossa on suhteessa enemmän kaasutilaa, jolloin vapautuva kaasu muodostaa laimeamman seoksen. Olisi hyödyllistä tutkia, kaasuuntuuko pieni erä todellisuudessa vähemmän kuin iso erä, jolloin voitaisiin määrittellä kerroin, joka laskisi tuotteelle riittävän kaasuuntumisaikan kahvin määrän huomioon ottaen.

## Matemaattinen mallintaminen

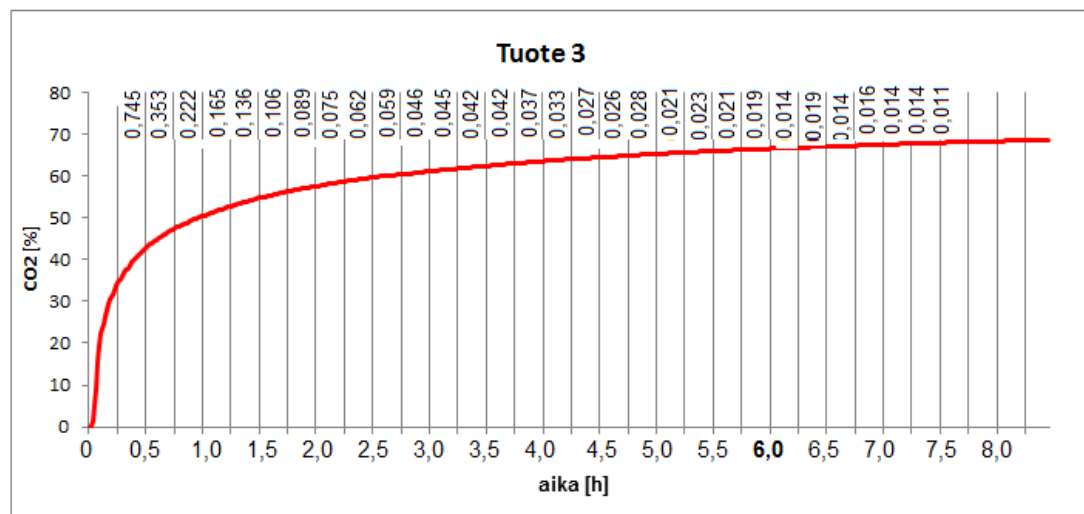
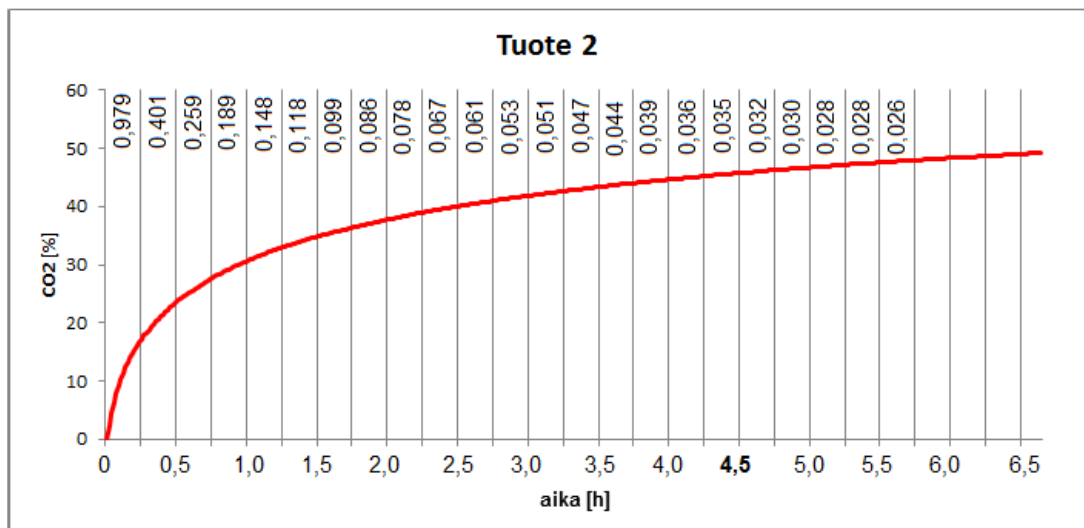
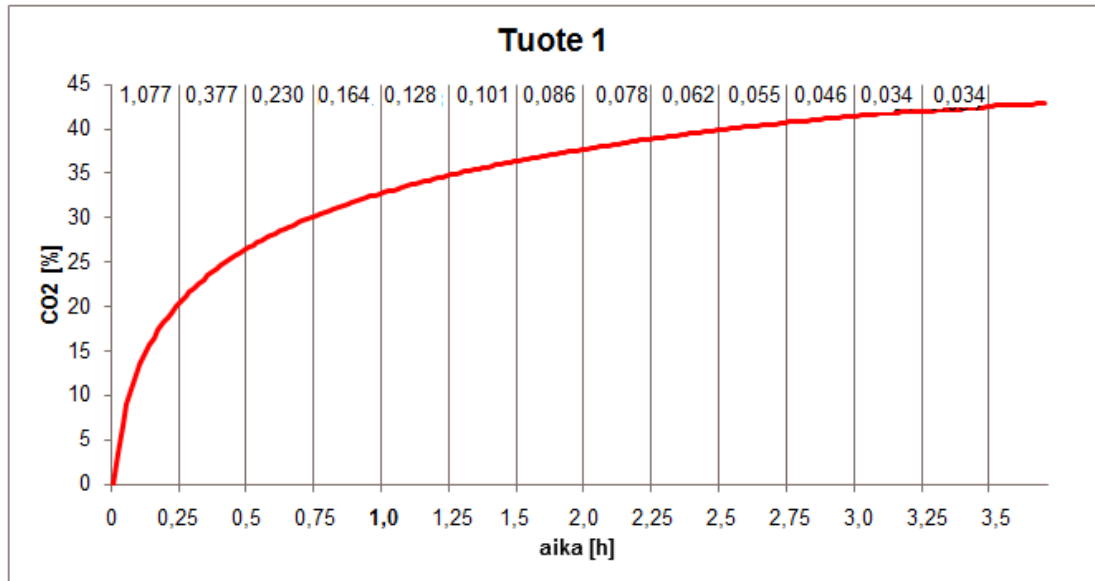


Kuva 17. Kaasuuntumiskäyrän matemaattinen mallintaminen. Alkuperäinen kaasuuntumiskäyrä, johon kahta mallia sovitetaan, on mustalla. Malli 1 on sininen viiva ja malli 2 on vihreä viiva. Mallin ennustama maksimiarvo on samanvärinen vaakasuora viiva (mallin 2 maksimiarvo ei näy kuvassa).

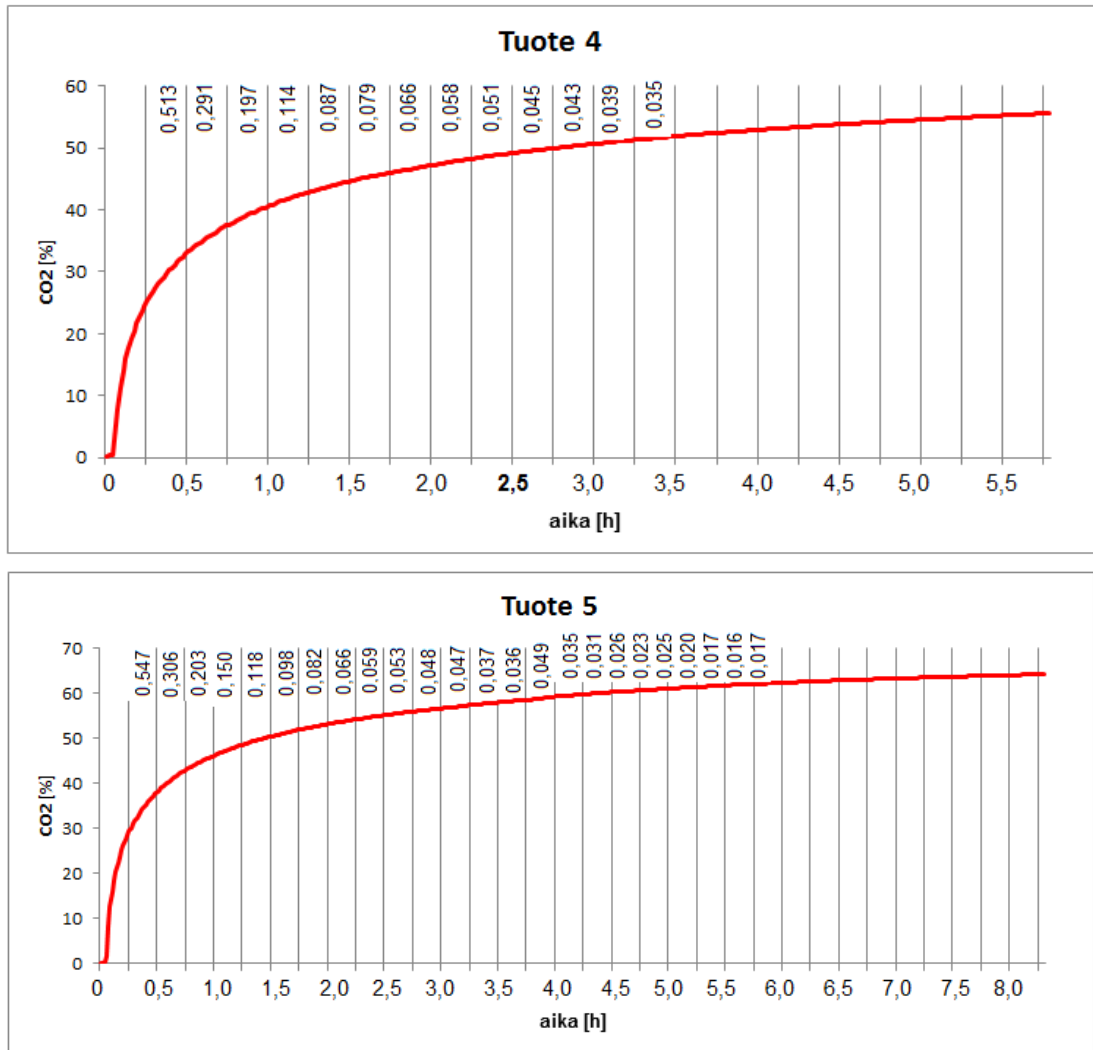
Kaasuuntumiskäyrän kulkua kokeiltiin ennustaa matemaattisen mallintamisen avulla. Mallintamiseen liittyy usein ongelmia, malli ei vastaa todellisuutta vaan on aina arvio, approksimaatio. Erityisesti kompleksiset ilmiöt ja pitkän aikavälin toiminnot, joissa on paljon muuttujia, ovat vaikeasti tai eivät lainkaan mallinnettavissa. Onnistuneella mallilla voidaan selvittää syy-seuraussuhteita, optimoida tuotanto-olosuhteita ja vertailla eri ratkaisuvaihtoehtoja. Tässä tapauksessa mittaustuloksista valitaan käyrä, johon malleja sovitetaan, ja ajanjakso, jonka perusteella mallien sovittaminen tehdään, kutsutaan tätä sovitusajaksi. Mallintamisessa käytetty komentotiedoston koodi on liitteessä 2. Mallin tulisi alkukäyrän kulun perusteella kyetä ennustamaan mahdollisimman tarkasti, kuinka korkealle käyrä nousee ja milloin se alkaa tasaantua. Hyvä ennustus muistuttaisi alkuperäisen käyrän muotoa eikä eroaisi siitä yli 5 prosenttiyksikköä kumpaankaan suun-

taan. Kuvassa 17 musta viiva on alkuperäinen kaasuuntumiskäyrä. Sovitusajaksi valittiin 20 min, jonka perusteella mallit ennustivat käyrän kulun ja laskivat funktion maksimiarvon (samanvärinen vaakasuora viiva) eli sen, kuinka korkealle kaasuuntumiskäyrä nousee. Mallin 1 (sininen) mukaan kaasuuntuminen alkaisi tasaantua alkuperäistä käyrää aikaisemmin ja teoreettinen maksimi ei nousisi yli 60 %:n. Malli 2 (vihreä) taas ennustaa paljon jyrkemmin nousevan käyrän, ja maksimiarvon, joka on yli 80 % eikä näy kuvassa. Mallintamista kokeiltiin eri kahveilla, erikokoisilla kaasuuntumiserillä (1000–4000 kg) ja eripituisilla sovitusaajoilla (20 min–4 h). Mitä pidempi aika sovitukselle valittiin, sitä paremmin malli vastasi alkuperäistä käyrää. Saadut tulokset eivät olleet niin lupaavia kuin odotettiin. Mallintamiskokeilujen tarkoituksena oli kokeilla, kuinka lyhyellä sovitusaajalla käyrän kulku on luotettavasti ennustettavissa. Tulosten käsittely ja mallintaminen on työlästä, hidasta ja vaatii erikoista tietotaitoa. Mallintamista kokeiltiin tässä työssä vain kahdella mallilla, ja käytössä oleva aika oli rajallinen. Mittausten alkuvaiheessa ei ollut saatu selville kaikkia olennaisia kaasuuntumiseen liittyviä seikkoja, joita olisi voitu käyttää hyväksi parempaa mallia etsittäessä. Näillä menetelmillä ei siis saatu aikaan toivottuja tuloksia, ja perinpohjaisempi tutkimus olisi tehnyt työstä liian laajan. On kuitenkin täysin mahdollista, että analysoimalla mittausaineistoa perusteellisemmin ja laajemmin ottaen huomioon kaasuuntumiseen vaikuttavat tekijät voitaisiin löytää malli, joka kuvaisi kahvin kaasuuntumista riittävän tarkasti.

## Kaasuuntumiskäyrän kulmakertoimen määrittäminen





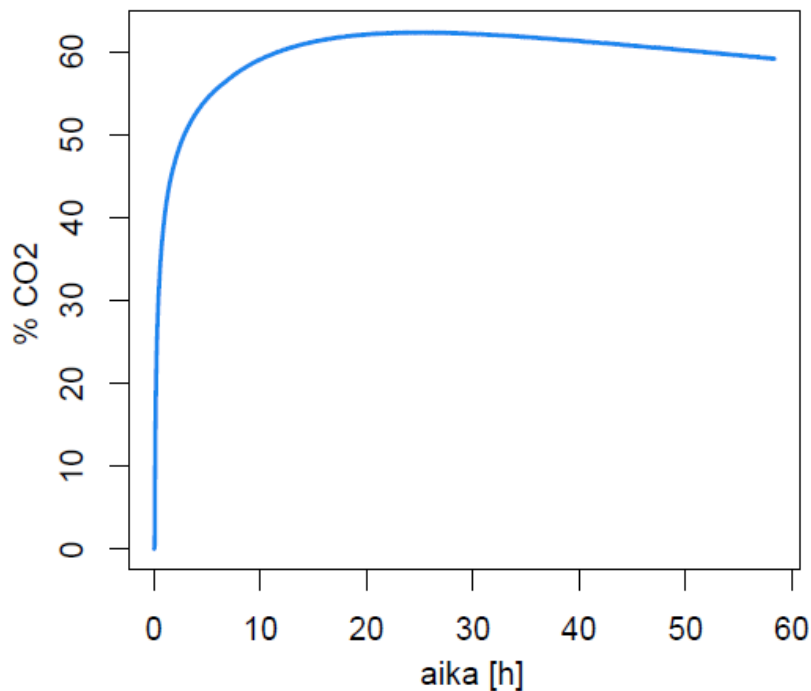


Kuva 18. Viiden eri tuotteen kaasuuntumiskäyrien kulmakertoimen muuttumisen seuranta kaasuuntumisen aikana.

Tutkittiin myös, miten kaasuuntumiskäyrän kulmakerroin muuttuu kaasuuntumisen edetessä, ja onko kulmakertoimien muutoksessa säännönmukaisuutta. Käyrä jaettiin 15 min jaksoihin, joista kullekin laskettiin kulmakerroin käyttämällä kaikki jakson sisällä olevia hiilidioksidipitoisuuksien arvoja. Kuvassa 18 on esitetty viiden eri tuotteen kulmakertoimen muutos. Selkeyden vuoksi kustakin tuotteesta valittiin tarkasteltavaksi vain yksi käyrä. Tuotteet edustavat eri paahto- ja jauhatusasteita, ja yksi kahveista sisältää arabican lisäksi robustaa. Käyrät ovat siis varsin edustava otos tekijöistä, jotka vaikuttavat kaasuuntumiseen. Kuvista havaittiin, että kulmakertoimen laskiessa arvon 0,040 alapuolelle, kaasuuntumisen voimakkuus laantuu eli käyrän jyrkkyys alkaa tasaantua. Laantumisen viittaa siihen, että kaasuuntumisen kiivain vaihe olisi ohi, mutta tarkkaa ajanhetkeä, jolloin kahvi on kaasuuntunut tarpeeksi, kulmakertoimet eivät anna. Kaasuuntumiskäyrän tasaantumista on mahdollista arvioida myös silmämääräises-

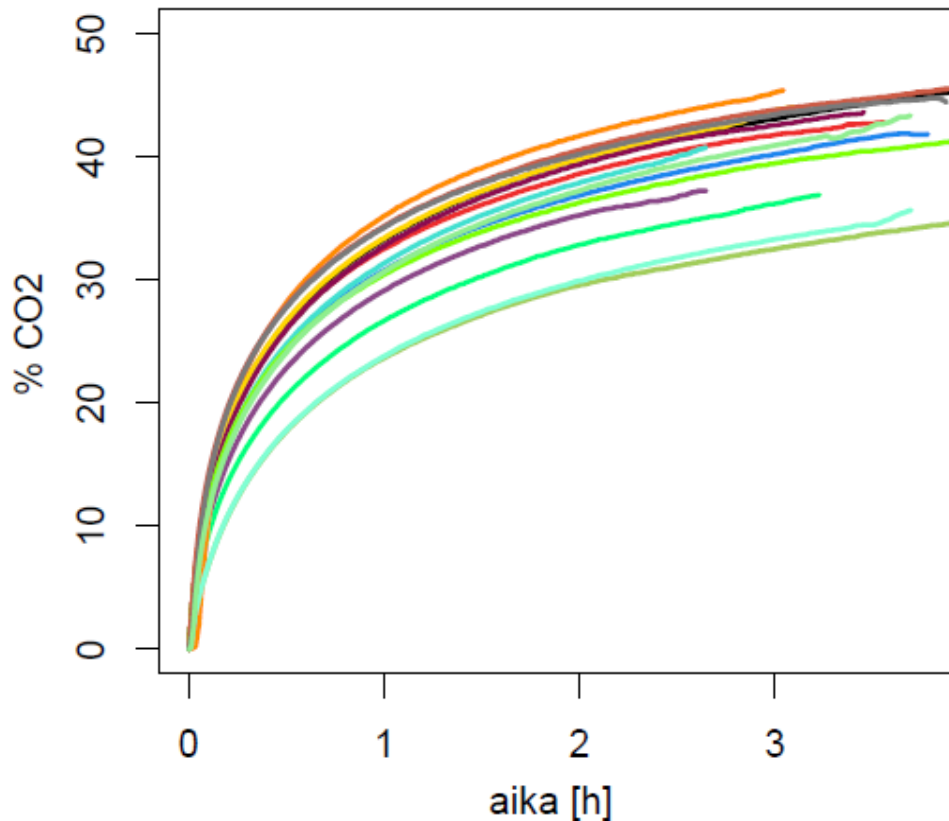
ti, joten asian tutkimista ei kannattanut jatkaa. Sekä matemaattisessa mallintamisessa että kulmakertoimien tutkimisessa etsittiin tapaa ennustaa käyrän kulku matemaattisesti. Tieto mahdollistaisi parhaillaan kaasuuntuvan kahvin tilan seuraamisen, jolloin kaasuuntuminen voitaisiin lopettaa juuri oikeaan aikaan ja kahvi saataisiin pakattavasti mahdollisimman nopeasti.

Pitkän kaasuuntumisajan (>10 h) tuotteiden tutkiminen johti tärkeään havaintoon: siilon hiilidioksidipitoisuus nousee vain tiettyyn pisteeseen asti, jonka jälkeen se alkaa laskea. Rationaalisesti voidaan järjeillä, ettei kaasun vapautuminen voi jatkua loputtomasti, vaan jossain vaiheessa hiilidioksidia ei enää ole. Pitoisuuden lasku voidaan olettaa johtuvan myös siilossa tapahtuvista kemiallisista reaktioista, joiden seurauksena hiilidioksidin pitoisuus laskee ja muiden kaasujen pitoisuus nousee. Kuvassa 19 kaasuuntuminen on aluksi erittäin voimakasta, käyrä nousee jyrkästi ja korkealle, kunnes 25 h:n jälkeen hiilidioksidin määrä vähenee. Hiilidioksidipitoisuus pysyy kuitenkin 50 %:n yläpuolella vielä noin 30 h:n ajan. Kaasuuntuminen voi jatkua viikkoja, jopa kuukausia (katso s. 16, 17) ennen kuin kaikki hiilidioksidi on vapautunut jauhetusta kahvista. [2, s. 225.] Suurimmalla osalla tuotteista kaasuuntumisaika on alle 10 h, jolloin hiilidioksidipitoisuus ei ehdi kääntyä laskuun, kun kahvin pakkaaminen aloitetaan kaasuuntumiskäyrän ollessa vielä nousevassa vaiheessa.



Kuva 19. Tuotteen 5 kaasuuntumiskäyrä. Käyrä saavuttaa maksimiarvonsa noin 25 h:n kohdalla, jonka jälkeen hiilidioksidipitoisuus alkaa laskea.

### Stabiloitumisajan vaikutus kaasuuntumiseen

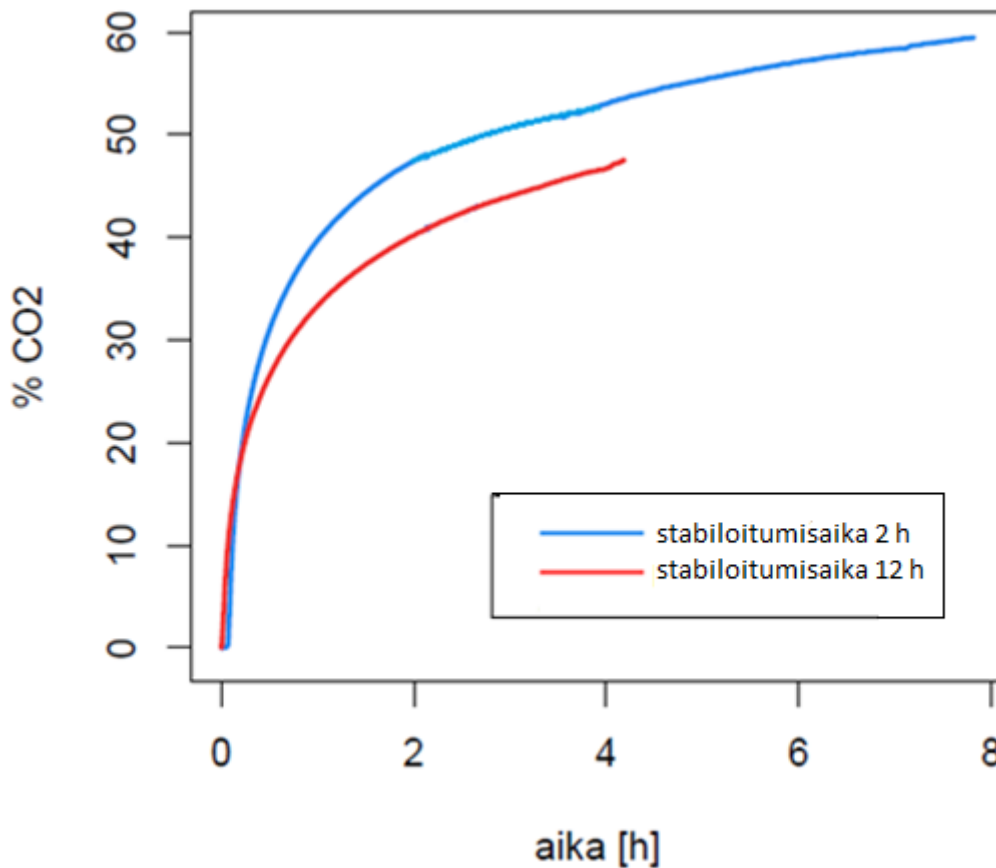


Kuva 20. Tuotteen 1 kaasuuntumiskäyrien vertailu. Eriä on 15 kpl, joista kukin on 4000 kg.

Kuvaan 20 on mielenkiinnon vuoksi laitettu monta kaasuuntumiskäyrää yhteen kuvaan. Oletuksena on, että erät, jotka ovat samaa kahvia ja samankokoisia, kaasuuntuisivat samalla tavalla. Teorian mukaankäyrien pitäisi siis olla samassa kohdassa ja kulkea päällekkäin. Todellisuudessa, vaikka enemmistö käyristä sijaitsee samalla alueella, hajoama on suuri, ja muutama käyrä on selkeästi muista poikkeavia. Erot selittyvät osaksi stabiloitumisajalla (katso s. 10). Tiedetään, että stabiloitumisajan pituudella on vaikutusta kahvin kaasuuntumiseen. Mitä pidempään kahvi on stabiloitunut paahtamisen ja jauhamisen välillä, sitä heikommin se kaasuuntuu. Stabiloitumisaikana samoin kuin kaasuuntumisen aikana kahvista vapautuu hiilidioksidia ja aromiaineita, tosin vapautuminen kokonaisista pavuista on hitaampaa kuin jauhetusta kahvista. Gustav Pauligilla kahvipapujen standardin mukainen stabiloitumisaika on 2–4 h, jonka jälkeen kahvi pitäisi jauhaa, antaa kaasuuntua ja pakata mahdollisimman nopeasti. Tuotantoseisokkien takia vuoroa varten paahdetusta kahvista osa saattaa jäädä seuraavan vuoron jauhattavaksi, mikä venyttää stabiloitumisaikaa. On huomattu, että pitkä stabi-

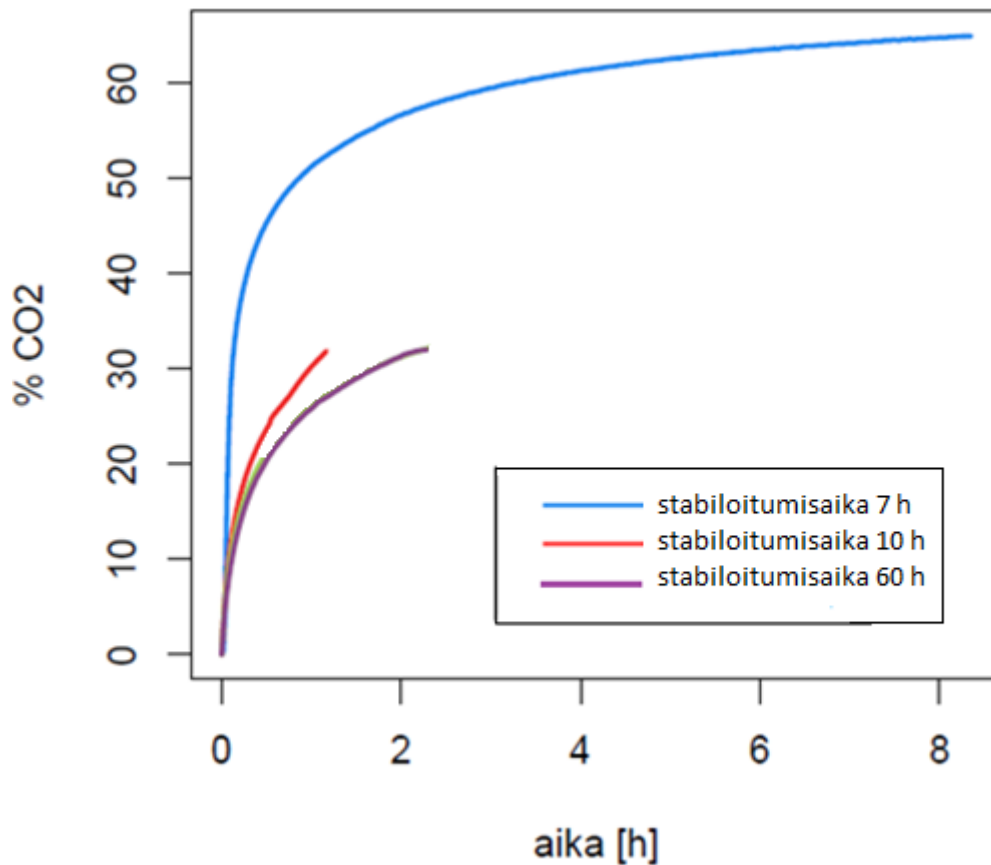
loitumisaika lyhentää kaasuuntumisaikaa. Pari päivää stabiloitunut kahvi voidaan pakata heti jauhamisen jälkeen ilman kaasuuntumisaikaa.

Mittausaineistosta valittiin tuotteet, joista oli tarpeeksi vertailukelpoista tietoa. Kustakin kaasuuntumiserästä selvitettiin, milloin se oli paahdettu ja kuinka kauan se oli stabiloitunut ennen jauhamista. Tuotteesta 1 oli paljon aineistoa, mutta kahvisekoituksen komponentit paahdetaan kahdessa erässä, jotka yhdistetään ennen jauhamista, mikä teki erien jäljittämisen lähes mahdottomaksi. Kuviiin 21 ja 22 on valittu kaksi muuta tuotetta, joista tarvittavat tiedot oli helpompi jäljittää. Kuvissa on havainnollistettu stabiloitumisajan vaikutusta kaasuuntumisen voimakkuuteen (hiilidioksidin määrään ja käyrän jyrkkyyteen).



Kuva 21. Tuotteen 6 kahden kaasuuntumiskäyrän vertailu, kumpikin erä on 4000 kg.

Kuvassa 21 on tuotteen 6 kaksi kaasuuntumiserää, jotka ovat 4000 kg. Sinisen kahvin-stabiloitumisaika on 2 h ja punaisen 12 h. Tuote 6 on tumma kahvi, minkä voi päätellä hiilidioksidin korkeasta pitoisuudesta. Tässä tapauksessa stabiloitumisajan ylitys 10 h:lla aiheuttaa noin 10 prosenttiyksikön eron vapautuneen hiilidioksidin määrässä.



Kuva 22. Tuotteen 7 stabiloitumisaikavertailu, kaikki erät ovat 4000 kg.

Tuote 7 on tumma, hienoksi jauhettu kahvi. Kuvassa 22 on vertailtu tuotteen 7 kolmea 4000 kg:n erää. Sininen käyrä on normaalin näköinen, hiilidioksidipitoisuus on tumman kahvin tapaan korkea. Stabiloitumisajan minimiarvo on kuitenkin ylitetty 5 h:lla, joten sininen käyrä on alempana kuin käyrä, jonka stabiloitumisaika olisi aikarajojen sisällä, josta ei valitettavasti ole mittaustietoa. Sinisellä ja punaisella käyrällä stabiloitumisajan ero on vain 3 h, mutta pitoisuusero on huomattava: noin 15 prosenttiyksikköä. Voitaisiin sanoa, että punainen käyrä on lähempänä violettiä kuin sinistä. Violetti käyrä taas on erästä, joka on paahdettu perjantaina iltavuorossa, kahvi on levännyt koko viikonlopun ja maanantaiaamuna kahvi jauhettiin ja pakattiin heti ilman kaasuuntumisaikaa. Sinisen ja violetin käyrän ero on 53 h, mikä vastaa noin 25 prosenttiyksikön pitoisuuseroa, punaisen ja violetin käyrän ero on 50 h ja 10 prosenttiyksikköä.

## 7 Yhteenveto

Tulosten käsittely Excelillä on työlästä ja aikaa vievää. Mittausaineistoa on todella paljon, jopa kymmeniä tuhansia rivejä. Data on järjestettävä mittauskanavittain omiksi sarakkeikseen, piirrettävä siitä kuvaaja ja sen perusteella haarukoitava ne pisteet, joiden välille haluttu käyrä osuu. Näin saadaan jatkokäsiteltäväksi vasta yksi kaasuuntumiskäyrä. Jonkin tilasto-ohjelman käyttäminen taas vaatii erikoisosaamista ja ohjelmointitaitoja. Mittausvälin harventaminen helpottaa tietojen käsittelyä, mutta saattaa huonontaa tulosten tarkkuutta, kun mittauspisteiden välillä on enemmän etäisyyttä, ja väliin jäävät arvot on interpoloitava.

Näin toteutettuna kaasuuntumiskäyrän matemaattinen mallintaminen ei onnistunut. Käyrän muoto elää kaasuuntumiseen vaikuttavien tekijöiden yhteisvaikutuksen mukaisesti ja on siten vaikeasti mallinnettavissa. Mallintamista varten luotua komentotiedostoa voitiin hyödyntää muilta osin tulosten käsittelyssä, jossa komentotiedosto teki kaikista suurimman työn tulosten silottamisessa, järjestämisessä ja taulukoinnissa. Kulmakertoimen määrittämisessä tavoiteltiin samaa asiaa kuin matemaattisessa mallintamisessakin. Kukin käyrä on muodoltaan erilainen eikä yksittäisistä käyristä voida tehdä mitään yleisesti päteviä johtopäätöksiä. Näiden menetelmien avulla voidaan arvioida, millä alueella optimaalinen kaasuuntumisaika mahdollisesti sijaitsee. Arviota voidaan hyödyntää suunnitellessa pakkauskoetta (katso s. 18), jonka tuloksena uusi kaasuuntumisaika saadaan.

Mittaukset antoivat mielenkiintoista lisäymmärrystä kahvin kaasuuntumiskäyttäytymisestä. Kuten arveltiin, hiilidioksidipitoisuuden mittaus kahvin sisältä antoi parempia tuloksia kuin pinnalta mitattuna. Osoitettiin, että tummat kahvit kaasuuntuvat enemmän kuin vaaleat, ja että kahvisekoitukset, joissa on robustaa, kaasuuntuvat voimakkaammin kuin kahvit, joissa on vain arabicaa. Jauhatusasteella on suuri vaikutus: pieni partikkelikoko ja suuri pinta-ala nopeuttavat kaasuuntumista huomattavasti, jolloin hienommaksi jauhettu kahvi vapauttaa enemmän hiilidioksidia kuin karkea kahvi. Tiedetään myös, että suurin osa hiilidioksidista vapautuu jo jauhatuksessa. Havaittiin, että vapautuvan hiilidioksidin määrä on jossain määrin riippuvainen kaasuuntuvan kahvierän koosta. Näyttäisi siltä, että 2000 kg kaasuuntuisi heikommin kuin 4000 kg, kuitenkin 3000 ja 4000 kg:n välillä ei ole suurta eroa. Asiaa vaatii jatkotutkimusta, näennäinen ero saattaa johtua siitä, että pienellä erällä on silloin suurempi kaasutila kuin

normaalilla erällä. Paahdon jälkeinen stabiloitumisaika toimii ikään kuin esikaasuuntumisaikana, jolloin kahvista vapautuu hiilidioksidia, muita kaasuja ja aromiaineita. Pitkä stabiloitumisaika vaikuttaa kaasuuntumisen voimakkuuteen heikentävästi. Noin 2 vrk stabiloituneen kahvin ei tarvitse kaasuuntua ollenkaan. Laadukkaan kahvin tekeminen onkin tuotantoprosessin eri vaiheiden hallitsemista ja yllättävien tilanteiden sattuessa niiden seikkojen kanssa tasapainoilemista.

## 8 Pohdinta

Mittauksen jatkuvuuden parantamiseksi ja tukosten ehkäisemiseksi on estettävä mittausletkun vääntyminen solmuun. Kun siiloa täytettiin, letku jäi usein huonoon asentoon, jolloin ilmanvirtaus estyi ja mittaus pysähtyi. Tämä aiheutti monta vastoinkäymistä, ja oli ehdottomasti suurin ongelma mittauksissa. Mittaustuloksia ei saatu ennen kuin tuotos saatiin poistettua. Vääntymisen välttämiseksi letku on tuettava niin, että se pysyy suorana tai osa siitä voitaisiin korvata ohuella putkella. Mittauksen valvomista helpotaisi analysaattorin näytön reaaliaikainen seuranta oman tietokoneen ruudulla esimerkiksi liittämällä koneet toisiinsa etäyhteydellä. Näin tukokset huomattaisiin ajoissa, ja niiden aiheuttama vahinko pystyttäisiin minimoimaan. Huomattiin myös, että kun imu-pää oli siilon pohjalla (noin 4 m siilon katosta), mittaus pysähteli jatkuvasti. Optimaalinen mittauskorkeus on noin 2–3 m siilon yläpäästä, jolloin näytteenottopää ei jää ilmaan, eikä ole liian syvällä (katso kuva 12).

Kahvilaboratorion Anagas CD 98 Incubator -analysaattorilla tehdyt mittaukset eivät ole vertailukelpoisia Map Check 3 -analysaattorin tulosten kanssa. Laitteilla on eri mittaus-epävarmuudet, koejärjestelyt ovat erilaiset ja tulokset ovat eri asteikoilla. Anagas-mittaukset tehdään pienoismittakaavassa. Tutkittavana on 1 kg kahvia, jonka vapauttama hiilidioksidipitoisuus keskimäärin on noin 3 %. Map Check 3 mittaa tilannetta kaasuuntumissiilosta, jossa kahvia on 1000–4000 kg ja hiilidioksidipitoisuus siilossa on noin 40 %. Laboratoriossa pienessä mittakaavassa kahvin annetaan ”ylikaasuuntua” noin 2 vrk:n ajan, jonka jälkeen tuloksista määritetään maksimiarvon perusteella optimaalinen kaasuuntumisaika eli ajanhetki, joka vastaa noin 60 %:n hiilidioksidipitoisuutta. Oikeassa mittakaavassa kaasuuntumiserät eivät ehdi saavuttaa maksimiarvoaan, joten ei ole mahdollista käyttää samaa laskutapaa kaasuuntumisajan määrittämisessä.

Aluksi luultiin, että kaasuuntumiskäyrä jatkaa hiljalleen nousuaan loputtomasti. Mutta pitkään kaasuuntuvien tuotteiden tutkiminen paljasti, että käyrä nousee vain tiettyyn maksimiarvoonsa ja alkaa sen jälkeen laskea. Kirjallisuudesta etsittiin selitystä hiilidioksidin nollatason suurelle vaihtelulle. Siiloissa saattaa olla vuotokohtia, tosin edes samassa siilossa nollataso ei ollut vakio. Voi myös olla, että kahvista vapautuvat kaasut ja aromaattiset yhdisteet reagoivat ennestään tuntemattomalla tavalla, joka vaikuttaa kaasuuntumissiilon hiilidioksidi- ja happipitoisuuksiin.



Mittaustuloksien perusteella havaittiin, että kahvierän koolla näyttäisi olevan vaikutusta kaasuuntumiseen. Jos jauhetaan 2000 kg ja 4000 kg kahvia, edellä mainitun kaasuuntumiskäyrä jää matalammalle kuin viimeisen. Pitäisi tutkia, että kaasuuntuuko pienempi määrä kahvia vähemmän kuin suuri määrä vai johtuuko näennäinen ero siilon hiilidioksidipitoisuudesta siitä, että vajaassa siilossa kaasutila on suurempi ja hiilidioksidipitoisuus ei nouse niin korkealle kuin täyden siilon tapauksessa. Kokeen voisi järjestää jauhamalla samaa erää olevaa kahvia 2000 kg:n siilo täyteen ja 4000 kg:n siilo puolitäyteen, ja verrata saatuja tuloksia. Mikäli pienelle erälle riittää lyhyempi kaasuuntumisaika, olisi järkevää luoda kerroin, joka laskee sopivan kaasuuntumisajan kahvin määrän mukaan. Esimerkiksi jos 4000 kg kahvia kaasuuntuu 4 h, niin 2000 kg:lle kahvia saattaa riittää kaksi kolmasosaa tuosta ajasta. On myös huomioitava, että kaasuuntumisaikaa aletaan laskea jauhamisen loputtua. 4000 kg:n siilon täyteen jauhamiseen kuluu noin 1 h, joten käytännössä pohjalla oleva kahvi kaasuuntuu enemmän kuin viimeiseksi jauhettu. Kaasuuntumissiilo tyhjenetään alakautta, joten ensimmäiseksi jauhettu kahvi myös pakataan ensimmäisenä. Myös siilon tyhjentämisessä kuluu aikaa. Näin ollen kaasuuntumisaikalaskurin voisi käynnistää heti kun siiloa aletaan täyttää.

Pakkauskokeet, joiden perusteella nykyiset kaasuuntumisajat on määritetty, on tehty pahimman mahdollisen tilanteen mukaan minimilepoajoilla, ja kunkin kokeen tulokseen on lisätty hieman turva-aikaa. Voisi olla hyödyllistä määritellä kullekin tuotteelle pessimistinen, realistinen ja optimistinen kaasuuntumisaika. Säilyvyyskokeen vakuumin seurantalosten mukaan voitaisiin pohtia, mihin suuntaan kaasuuntumisaikaa pitäisi muuttaa. Tuotteet, joiden kanssa ei ole ongelmia, saataisiin siten nopeammin pakattua. Oteetaan huomioon myös se, että stabiloitumisajan venyminen lyhentää kaasuuntumisen tarvetta. Noin 48 h stabiloitunut kahvi voidaan pakata heti kun se on jauhettu. On tärkeää selvittää järjestelmällisesti, miten eri tuotteilla stabiloitumisaika vaikuttaa kaasuuntumiseen tutkimalla saman paahtoerän eri aikaan jauhettuja eriä. Olisi varmasti järkevää laadun kannalta määritellä toimintaohjeet tilanteeseen, jossa stabiloitumisaikaa joudutaan pidentämään. Esimerkiksi 2 h:n viivästys stabiloitumisajassa lyhentäisi kaasuuntumisaikaa 1 h:lla.

Jatkotutkimuksissa olisi tärkeää kerätä järjestelmällisesti tarpeeksi mittaustietoa jokaisesta kahvituotteesta ja tutkia tarkemmin kaasuuntumiseen vaikuttavien tekijöiden merkitystä. On tutkittava esimerkiksi, kuinka paljon paahtoasteen nousu yhdellä asteella pidentää kaasuuntumisaikaa, millainen vaikutus on jauhatusasteella ja robustan osuudella kahvisekoituksessa. On selvitettävä tarkasti, miten stabiloitumisajan ylitys

lyhentää kaasuuntumisaikaa eri tuotteilla, ja mistä kahvin määrän aiheuttama ero hiilidioksidipitoisuudessa todellisuudessa johtuu. Tulosten perusteella voidaan suunnitella kaasuuntumisajoille kertoimet, jotka riippuvat näistä eri tekijöistä. Kaasuuntumiskäyrän kulun perusteella voidaan arvioida, milloin kaasuuntumisen kiivain vaihe on ohi ja siten etsiä aikaväli, jossa paras kaasuuntumisaika todennäköisesti sijaitsee. Sen perusteella voidaan suunnitella pakkauskoe, jolla tulos varmistetaan. Näin jokainen kahvierä olisi uniikki ja sen kaasuuntumistarve määritettäisiin prosessin parametrien mukaan, ja joka kaasuuntuisi vain sen verran kuin on tarpeellista.

## Lähteet

- 1 Jansen, Gerhard. 2006. Coffee Roasting: Magic - Art - Science. Munich: SV Corporate Media GmbH.
- 2 Rothfos, Bernhard. 1986. Coffee Consumption. Hamburg: Gordian-Max Rieck GmbH.
- 3 Illy, Andrea & Viani, Rinantonio. 1995. Espresso Coffee: The Chemistry of Quality. London: Academic Press.
- 4 125 vuotta nautinnollisia hetkiä - Paulig. 2001. Verkkodokumentti. Oy Gustav Paulig Ab. <[http://www.pauliggroup.com/fi/files/Paulig\\_125\\_FI.pdf](http://www.pauliggroup.com/fi/files/Paulig_125_FI.pdf)>. Luettu 24.6.2013.
- 5 Paulig, Bertel. 1977. Kahvikirja. F.G. Lönnberg.
- 6 Where the Coffee is Grown. Verkkosivu. Coffee Beans (Irish online retailer). <<http://www.coffeebeans.ie/about-coffee-page34052.html>>. Luettu 20.6.2013.
- 7 Coffee: Drink of the Gods? Verkkosivu. The Why Files - The Science behind the News. Photo by Fernando Rebelo. <<http://whyfiles.org/2011/coffee-drink-of-the-gods/>>. Luettu 20.6.2013.
- 8 Schwenk, Arno. 2012. The Science and Art of Roasting. Coffee Conference 2012. Luentomateriaali. Emmerich: Probat-Werke GmbH.
- 9 Provisional exports by exporting countries to all destinations. 2013. Verkkodokumentti. ICO, International Coffee Organization. <<http://www.ico.org/prices/m3.htm>>. Päivitetty 5.3.2013. Luettu 3.7.2013.
- 10 Allen, Timo. 2013. Senior Sourcing Manager, Oy Gustav Paulig Ab, Helsinki. Keskustelu 13.6.2013.
- 11 Finland: Per capita consumption. 2011. Verkkodokumentti. ICO, International Coffee Organization. <<http://www.ico.org/countries/finland.pdf>>. Luettu 20.8.2013.
- 12 Vilhunen, Anna-Sofia. 2010. Kahvin kemiaa. Kandidaatin tutkielma. Helsingin yliopisto.
- 13 Sivetz, Michael & Desrosier, Norman. 1979. Coffee Technology. Avi Pub Co.

- 14 Nikula, Janne. 2012. ON-LINE kaasuuntumismittaukset 24.5–5.6.2012. Mittausraportti. Process Development Engineer, Oy Gustav Paulig Ab, Helsinki.
- 15 Laaksonen, Virpi. 2013. Product Development Technician, Oy Gustav Paulig Ab, Helsinki. Keskustelu 7.6.2013.
- 16 Dansensor. 2012. Map Check 3 User Guide. Kaasuntunnistusanalysointilaitteen käyttöohje.

## Map Check 3 analysaattorin pikakäyttöohje

Map Check 3 on kaasuntunnistusanalyysaattori, joka mittaa O<sub>2</sub>- ja CO<sub>2</sub>-pitoisuutta.

Älä koskaan käytä kovia työkaluja tai hiovia materiaaleja laitteen puhdistuksessa.

Älä peitä laitetta kankaalla tai muovilla suojataksesi sitä pölyltä.

Laitetta ei saa altistaa kosteudelle, kuumuudelle tai auringonvalolle.

Älä tuki kaasun ulostuloaukkoja.



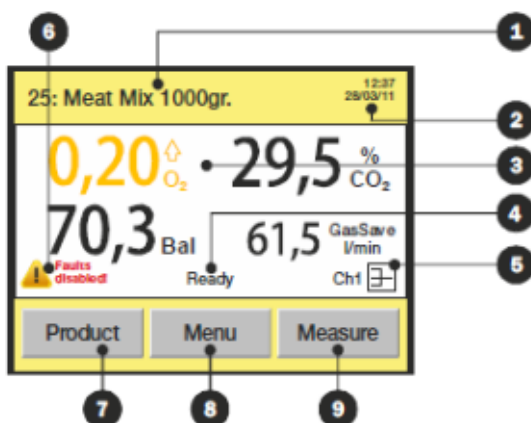
### 1. Analysaattorin käynnistäminen

Käynnistääksesi analysaattorin kytke virtajohto virtalähteeseen. Erillistä virrankatkaisinta ei ole. Laitte lämpenee 8 min ajan. Tarkista sillä aikaa mittausasetukset. Muuttaaksesi asetuksia kirjaudu *Supervisor*-tasolle, kts. 3.5.



Lämpenemisen jälkeen näytöllä lukee "Ready", ja mittauksen voi käynnistää.

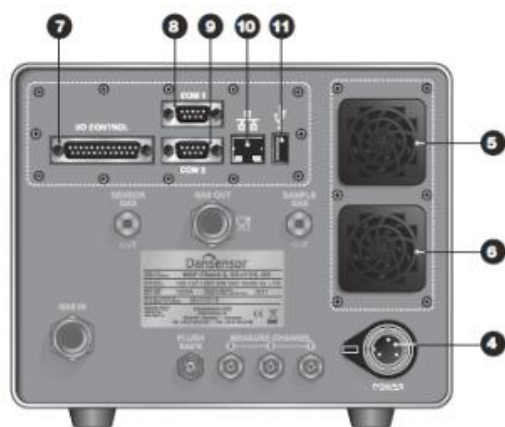
## 2. Analysaattorin osat



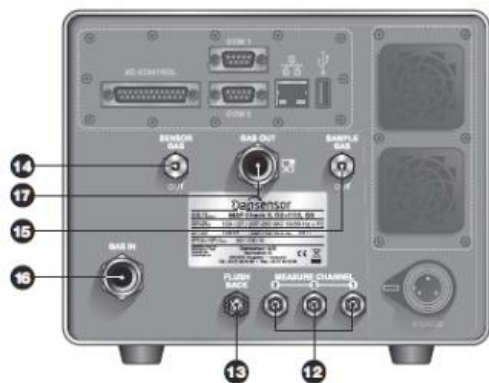
1. Mitattava tuote
2. Päivämäärä ja aika
3. Mittaustulos
4. Status - mittauksen tila
5. Mittauskanava
6. *Faults disabled* (mahdollista kytkeä pysäyttämään pakkauskone, mikäli hälytysraja ylittyy, ei päde tässä yhteydessä)
7. Tuotelistaan
8. Päävalikkoon
9. Mittauksen aloitus ja lopetus



1. Kosketusnäyttö
2. USB-portti



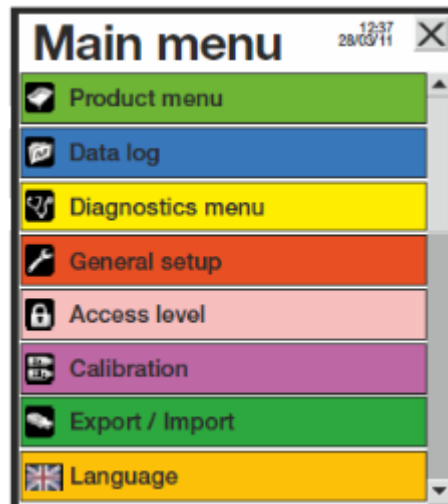
4. Virransyöttö
5. Jäähdytysilma sisään
6. Jäähdytysilma ulos
7. I/O liitäntä
8. COM1
9. COM2
10. LAN/Ethernet -portti
11. USB-portti



12. Mittauskanavat 1–3
13. Takaisinhuuhtelu
14. Kaasu ulos
15. Näyte ulos

### 3. Main menu - Päävalikko

Paina *Menu*-näppäintä päästäksesi päävalikkoon. Liiku valikossa nuolinäppäimillä. Paina X päästäksesi takaisin mittausnäkyeseen.



#### 3.1. Product menu - Tuotevalikko

*New product, Edit product, Delete product* - Luo, muokkaa ja poista tuotetietoja. Tuotteelle voi antaa nimen ja numeron, valita mitataanko CO<sub>2</sub>- ja/tai O<sub>2</sub>- pitoisuutta sekä määrittellä varoitus- ja hälytysrajat.

*View collected data* - Lista tallennetusta datasta tuotteittain jaoteltuna.

*Delete collected data* - Tallennetun datan poistaminen laitteen muistista tuotteittain.

*Delete all collected data* - Kaikkien datatietojen poistaminen. Tarkista ennen poistamista, että tiedonsiirto muistitikulle on onnistunut, kts. 4.3.

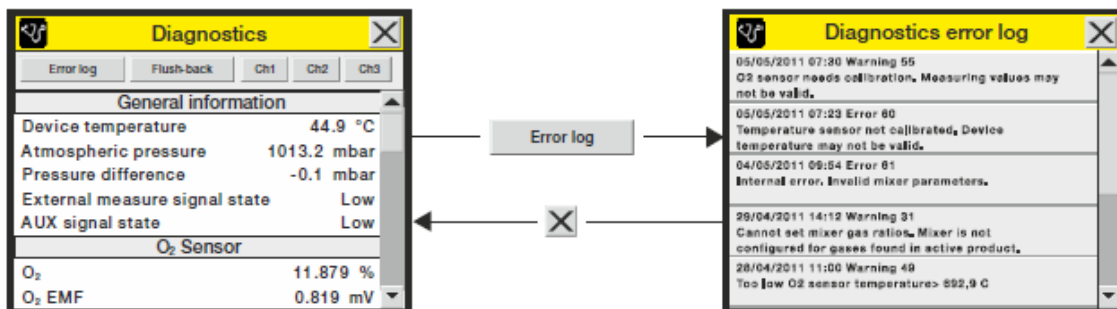
#### 3.2. Data log - Tallennettu data

Näyttää listan valittuna olevan tuotteen mittaustuloksista. Liiku listassa nuolinäppäimillä.

Sample time	MUX	%O <sub>2</sub>	%CO <sub>2</sub>
28/04/11 16:13:42	1	12.4	0.1
29/04/11 11:44:35	1	16.8	0.1
03/05/11 14:33:23	1	13.7	0.1

#### 3.3. Diagnostics menu - Diagnostiikka valikko

*General information* -ruudussa näkyvät laitteen sisäiset parametrit, joiden arvoja ei voi muuttaa. Esimerkiksi *Device temperature* - analysaattorin sisälämpötila. Laitteen ylikuumeneminen aiheuttaa virheilmoituksen ja pysäyttää mittauksen.



*Error log* - Virhelokiin tallentuvat kaikki virheilmoitukset. Yleisin virheilmoitus, joka pysäyttää mittauksen, on mittausletkun tukkeutuminen:

*Sample system clogged. Check hose for blockages.*

Tarkista, ettei letku ole taipunut tai vaurioitunut. Vaihda suodatin säännöllisesti. Kahvi-rasva hapertaa mittausletkua, joten se on uusittava tarpeen mukaan.

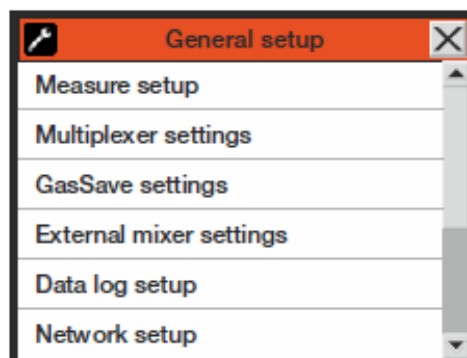
*Flush-Back* - Manuaalinen näyttelinjojen takaisinhuuhtelu.

### 3.4. *General Setup* - Yleiset asetukset

*Measure setup* - Mittausasetukset.

*Multiplexer (MUX) settings* - Mittauskanavan ja -ajan valinta.

*Data log setup* - Datatallennusasetukset.



*Backlight, Contrast, Brightness* - Näytön taustavalon, kontrastin ja kirkkauden säätö.

*Time, Date, Date Format* - Ajan ja päivämäärän muokkaus.

*Flow Unit, Pressure Unit, Temperature Unit* - Valitse, missä yksiköissä virtaus, paine ja lämpötila näkyvät *Diagnostics menu* -näkyvässä.

*Decimal separator* - Valitse, käytetäänkö tuloksissa "." vai "," desimaalin erottimena, kts. 4.3.

*Supervisor PIN code setup* - *Supervisor* koodin vaihto. Oletuksena 0000.

### 3.5. *Access Level* - Käyttäjätaso



Käynnistettäessä oletuksena on *User*-käyttäjätaso, muuttaaksesi asetuksia kirjautu *Supervisor*-tasolle. Näppäile PIN. Oletuksena on 0000.



### 3.6. *Calibration* - Kalibrointi

Analysaattorin kalibrointi suoritetaan huollossa. *Diagnostics* valikosta näkee, kauanko laite on ollut käynnissä, ja kuinka monta päivää on seuraavaan kalibrointiin (kalibroitava kerran vuodessa).

### 3.7. *Export/Import* - Tietojen tuonti ja vienti

*Export data collection of current product* - Valittuna olevan tuotteen tietojen siirto USB-tikulle.

*Export all data collections* - Kaikkien tuotteiden tietojen siirto USB-tikulle.

## 4. **Analysaattorin käyttö ja mittaaminen**

### 4.1. Tuotteen valitseminen

Tuotteenvaihdon ajaksi mittaus on pysäytettävä. Palaa valikosta mittausnäkyymään ja paina *Product*-näppäintä. Valitse listasta haluamasi tuote (1. Kahvi). Luoduille tuotteille on mahdollista määrittellä varoitus- ja hälytysrajat, mikä tässä käyttösovelluksessa ei ole mielekäästä. Olisi myös mahdollista integroida analysaattori osaksi tuotantolinjaa, ja ohjelmoida se pysäyttämään pakkauskone, mikäli hiilidioksidipitoisuus on hälytysrajojen ulkopuolella. Käytännössä tämä ominaisuus on tarkoitettu seuraamaan kaasupitoisuutta esimerkiksi makkaramassassa.

### 4.2. Mittaus

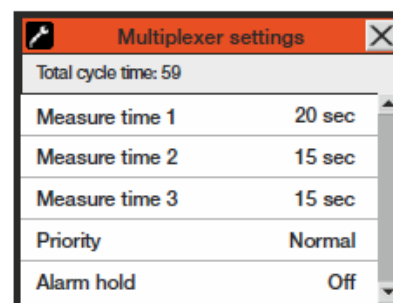
Analysaattorissa on kolme mittauskanavaa. Laite mittaa aina yhtä kanavaa kerrallaan ja siirtyy seuraavaan kanavaan halutun ajan jälkeen.

Tarkista, että laitteen kello on oikeassa, jotta tulosten aikaleima on oikein.

Määrittele mittausviive (*Measure delay*), jonka aikana mitattuja tuloksia ei tallenneta. Koska mittaus on jaksottaista, lukemat heittelevät aina kanavan vaihtuessa. Jos mittausviive on liian lyhyt, kunkin mittausjakson alkuun tulee selkeästi muusta aineistosta poikkeavia arvoja (*outlier*), joiden poistaminen manuaalisesti tulostenkäsittelyssä on vaivalloista.

*Menu* → *General Setup* → *Measure Setup* →  
*Measure Delay 1, 2, 3*

Syötä mittausviive sekunteina (minimi 3 s) joka kanavalle erikseen.



Multiplexer settings	
Total cycle time:	59
Measure time 1	20 sec
Measure time 2	15 sec
Measure time 3	15 sec
Priority	Normal
Alarm hold	Off

Valitse mittauskanava(t) ja -mittausaika kullekin kanavalle.

*Menu → General Setup → Multiplexer (MUX) Settings → Measure Time 1, 2, 3*

Näppäile sekuntimäärä, jonka jälkeen mittaus siirtyy seuraavaan kanavaan (minimi 10 s). Mittauskanaviin, joita ei käytetä, laitetaan arvoksi 0 s.

*Total cycle time* - Mittaus syklin kokonaispituus näkyy vasemmassa yläreunassa.

*Kaasuuntumismittauksissa käytetyt ajat: kullekin kanavalle 10 s viive ja 10 s mittaus. Syklin kokonaispituus 60 s. Eli 1 minuutin aikana mitataan 10 s ajan kustakin siilosta.*

Poistu valikosta mittausnäkömään ja käynnistä mittaus painamalla "Measure".

Mittauksen pysäyttämiseksi poistu valikosta mittausnäkömään, ja paina "Stop". Mittaamisen voi aloittaa heti uudelleen.

#### 4.3. Tiedonsiirto analysaattorista

Tietojen käsittely onnistuu kätevimmin tietokoneella. Analysaattori luo muistissa olevista tiedoista csv-tyyppisen (comma-separated values) tiedoston, jonka voi avata Excelillä. Muistitikulle tallennetut tiedot ovat mc3-nimisessä kansiossa. Tiedostonimi on muotoa 88130276\_mc3\_log\_1.csv, jossa alku on aina sama ja viimeinen numero viittaa tuotenumeroon (esimerkiksi 1. Kahvi). Näin ollen saman tuotteen tiedostonimet ovat identtisiä, joten muistitikulle kopioitaessa uusi tiedosto tallentuu vanhan päälle.

Analysaattorissa on oletuksena, että desimaalin erottimena käytetään pistettä, Excelin oletus taas on käyttää pilkkua.

Katso laitteen asetusten muuttaminen kohdasta 3.4. *Decimal separator*.

Excelissä vaihto tehdään seuraavasti:

*File → Options → Advanced → Use system separators*

Poista rasti ruudusta, ja kirjoita *Decimal separator* kohtaan "."

Tiedonsiirto USB-tikulle (mittausta ei tarvitse keskeyttää):

*Menu → Export/Import → Export Data Collection of All Data Collections*

Aseta muistitikku USB-porttiin (edessä ja takana).

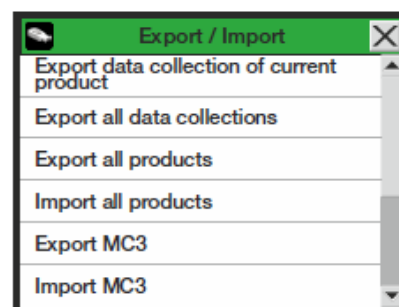
Odot, kunnes tiedot on siirretty. Poista tikku.

Kun olet tallentanut tiedoston koneelle, voit tyhjentää laitteen muistin.

*Menu → Product Menu → Delete All Collected Data*

Mikäli laitteen muisti on täynnä, laite antaa virheilmoituksen:

*Data Log Memory Full.*



Muisti on tyhjennettävä, ennen kuin uusia tuloksia voidaan tallentaa. Suositeltavaa on, että laitteen muisti tyhjennettäisiin vähintään viikon välein. Jos laitteen muistissa on paljon tietoa, datan käsittely on hankalaa ja laite hidastuu jonkin verran.

#### 4.4. Tulosten tarkastelu

Avaa tiedosto muistitikulta (aukeaa automaattisesti Excelissä). Tulostiedosto näyttää tältä.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Product		1 Kahvi												
2	Barcode	Default bar code 7													
3	O2 Warning		0	0											
4	O2 Alarm		0	0											
5	CO2 Warning		0	0											
6	CO2 Alarm		0	0											
7															
8	Date/time	Channel	%O2	Warning	Alarm	%CO2	Warning	Alarm	Bal	User field	Gas flow	Gas Consu	Trip Gas C	Trip consu	ID Text
9	24.6.2013 9:36	1	20.6426			0.23			79.1		0	0	0	0	#####
10	24.6.2013 9:36	1	20.7167			0.24			79		0	0	0	0	#####
11	24.6.2013 9:36	1	20.708			0.24			79.1		0	0	0	0	#####
12	24.6.2013 9:36	1	20.8			0.24			79		0	0	0	0	#####
13	24.6.2013 9:36	1	20.6798			0.26			79.1		0	0	0	0	#####
14	24.6.2013 9:38	2	19.6879			1.75			78.6		0	0	0	0	#####
15	24.6.2013 9:38	2	19.5511			1.76			78.7		0	0	0	0	#####
16	24.6.2013 9:38	2	19.6158			1.76			78.6		0	0	0	0	#####
17	24.6.2013 9:38	2	19.6012			1.76			78.6		0	0	0	0	#####
18	24.6.2013 9:38	2	19.5555			1.76			78.7		0	0	0	0	#####
19	24.6.2013 9:38	2	19.5751			1.75			78.7		0	0	0	0	#####
20	24.6.2013 9:38	3	12.867			21.18			66		0	0	0	0	#####

Ensimmäisillä riveillä on tuotteen tiedot. Sarakkeiden selitykset löytyvät alta. Oleellimmat on lihavoitu.

<b>Date/time</b>	<b>aikaleima</b>
<b>Channel</b>	<b>mittauskanava</b>
<b>%O2</b>	<b>O<sub>2</sub>-pitoisuus prosentteina</b>
Warning	Varoituksen alaraja
Alarm	Hälytyksen alaraja
<b>%CO2</b>	<b>CO<sub>2</sub>-pitoisuus prosentteina</b>
Warning	Varoituksen yläraja
Alarm	Hälytyksen yläraja
Bal (balance)	Laskennallinen typen määrä

Kopioi tärkeimmät sarakkeet toiselle välilehdelle. Järjestä ne mittauskanavan mukaan (Data → Sort → Sort by Channel/Column B), niin saat saman kanavan tulokset peräkkäin. Piirrä tuloksista kuva, kunkin kanavan tulokset omana viivanaan.

## R-ohjelmalla matemaattisessa mallintamisessa käytetty komentotiedoston koodi

```

File <- readline('Anna datatiedoston nimi: ')
Data <- read.csv(File,,skip=7,header=TRUE,sep=";")

time <- as.numeric(strptime(rownames(Data), "%d/%m/%y %H:%M:%S"))/3600
Time <- strptime(rownames(Data), "%d/%m/%y %H:%M:%S")

time <- time-time[1]

# Poimitaan kanava
# ja lasketaan keskiarvot ryhmittäin

Ch <- Data[,1]
group <- rep(0,length(Ch))
j <- 1
group[1] <- 1

for (i in 2:length(Ch)) {
  if(Ch[i]-Ch[i-1]!=0) j <- j+1
  group[i] <- j
}

N <- max(group)
T <- rep(" ",N)
for (i in 1:N) {
  T[i] <- as.character(mean(Time[group==i]))
}

Data2 <- data.frame(group=group,Ch=Ch,
  aika=time,CO2=as.numeric(Data[,5]))
Data3 <- aggregate(. ~ group,data=Data2,mean)

CO2.ch1 <- runmed(Data3[Data3[,2]==1,4],5)
time.ch1 <- Data3[Data3[,2]==1,3]
Time.ch1 <- T[Data3[,2]==1]
CO2.ch2 <- runmed(Data3[Data3[,2]==2,4],5)
time.ch2 <- Data3[Data3[,2]==2,3]
Time.ch2 <- T[Data3[,2]==2]
CO2.ch3 <- runmed(Data3[Data3[,2]==3,4],5)
time.ch3 <- Data3[Data3[,2]==3,3]
Time.ch3 <- T[Data3[,2]==3]

CO2 <- list(CO2.ch1,CO2.ch2,CO2.ch3)
time.all<- time
Time.all<- Time
time<- list(time.ch1,time.ch2,time.ch3)
Time <- list(Time.ch1,Time.ch2,Time.ch3)

# Käyrät

max.time<- ceiling(max(time.all))
channels<- 1:3
Colors <- c('blue','red','green')
Lwd<- c(2,2,2)
Lty<- c(1,1,1)

plot(time[[channels[1]]],CO2[[channels[1]]],type='l',
xlim=c(0,max.time),ylim=c(0,80),axes=FALSE,
      xlab='aika [min]',ylab='%CO2',lty=Lty[1],lwd=Lwd[1],col=Colors[1])

for (i in channels[2:length(channels)])

```

```

lines(time[[channels[i]]],CO2[[channels[i]]],type='l',
      lty=Lty[i],lwd=Lwd[i],col=Colors[i])

legend(0.6*max.time,80,c('ch 1','ch 2','ch 3'),
      lty=Lty,lwd=Lwd,col=Colors)

axis(1,at=seq(0,max.time,2),labels=seq(0,max.time,2))
axis(2,at=seq(0,100,5),labels=seq(0,100,5))

fit.channel<- as.numeric(readline('Anna mittauskanava: '))

käyrä1 <- locator(2)

i1 <- (1:length(time[[fit.channel]]))[time[[fit.channel]]>=käyrä1 $x[1]][1]
i2 <- (1:length(time[[fit.channel]]))[time[[fit.channel]]>=käyrä1 $x[2]][1]
print(c(i1,i2))
print(Time[[fit.channel]][c(i1,i2)])

x <- time[[fit.channel]][i1:i2]
t <- Time[[fit.channel]][i1:i2]
x <- x-x[1]
y <- CO2[[fit.channel]][i1:i2]

nx<- length(x)

windows()
plot(x,y,type='l',ylim=c(0,80))

tmax<- as.numeric(readline("Anna maksimiaika sovitukselle: "))

imax<- which.max(x[x<=tmax])
xx<- x[imax:nx]

fit.malli1=TRUE
if (fit.malli1) {
  malli1 <- nls(y ~ a-(10^b/(x+c))^0.5,
               start=list(a=1.2*max(y),b=3,c=.2),
               control=list(maxiter=5000,warnOnly=TRUE),subset=1:imax)
  lines(x,predict(malli1,newdata=list(x=x)),col='blue')
  lines(xx,predict(malli1,newdata=list(x=xx)),col='blue',lwd=3)
  b1 <- coefficients(malli1)
}

malli2 <- lm(y ~ x+l(x^2)+l(x*y)+l(x^2*y),subset=1:imax)
b2 <- coefficients(malli2)
lines(x,(b2[1]+b2[2]*x+b2[3]*x^2)/(1-b2[4]*x-b2[5]*x^2),col='green')
lines(xx,(b2[1]+b2[2]*xx+b2[3]*xx^2)/(1-b2[4]*xx-b2[5]*xx^2),col='green',lwd=3)

if(fit.malli1) abline(c(b1[1],0),col='blue',lwd=2)
abline(c(b2[3]/(-b2[5]),0),col='green',lwd=2)

print(c(b1[1],b2[3]/(-b2[5])))

tulostiedosto <- readline("Anna tulostiedoston nimi: ")
tulostusdata <- data.frame(pvm=t,aika=x,CO2=y)
write.table(tulostusdata,
            paste(tulostiedosto,'.txt',sep=""),row.names=FALSE)

```