

**Tekniikan kandidaatintyö**

**Kestävyyssindeksit teollisuudessa**

Lappeenranta 2021

Tommi Tiainen

## **TIIVISTELMÄ**

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT

Kemiantekniikka

Tommi Tiainen

### **Kestävyyssindeksit teollisuudessa**

Kandidaatintyö 2021

Kevät 2021

44 sivua, 12 kuvaa, 2 taulukkoa

Työn tarkastajat ja ohjaajat: Professori Tuomas Koironen, Apulaisprofessori Kristian Melin

Hakusanat: LCA, sustainable development, carbon balance, RED II, short-cut methods, carbon footprint, carbon emissions, energy/emission calculation

Ympäristön vaikutus otetaan teollisuutta koskevissa valinnoissa nykyään paremmin huomioon. Se on yksi merkittävimmistä aihealueista, kun määritetään teollisuuden prosessin tai yrityksen kestävyyttä. Kestävyyden määrittämiselle on kehitelty useita erilaisia indeksejä ja työkaluja, joita yritykset voivat hyödyntää omissa laskelmissaan. Ongelmana näissä usein on se, että ne vaativat paljon tietoa prosessista ja ne ovat työläitä laskea. Tämä vuoksi niitä on silloin vaikea soveltaa kokonaan uuden prosessin kehittämisessä.

Työn tarkoituksena oli tarkastella mahdollisia yksinkertaisempia laskentamenetelmiä hiilijalanjäljen määrittämiselle, millä pystytään tekemään karkeita arvioita teollisuuden prosessin ilmastokuormituksesta. Työssä tehtiin myös esimerkkilaskuja eri teollisuuden prosesseista ja verrattiin niistä satuja tuloksia monimutkaisempiin laskentamenetelmiin. Työssä lasketuilla tuloksilla voidaan todeta niiden olevan hyvin suuntaa antavia prosessin ilmastokuormitukselle.

## Sisällysluettelo

<b>1. Symboli- ja lyhenneluettelo .....</b>	<b>4</b>
<b>2. Johdanto .....</b>	<b>6</b>
<b>3. Päästöt teollisuudessa .....</b>	<b>7</b>
<b>4. Ilmastokuormituksen ja kestävyden määrittäminen .....</b>	<b>9</b>
<b>5. Kestävyden määritysmenetelmät .....</b>	<b>13</b>
<b>6. Laskentamenetelmien esittely.....</b>	<b>17</b>
6.1 REDII-direktiivi .....	17
6.2 Energian kulutus.....	20
6.3 Hiilen massatase.....	24
6.4 Laskuihin tarvittavat kertoimet .....	25
<b>7. Materiaalit ja menetelmät .....</b>	<b>26</b>
<b>8. Prosessien esittely .....</b>	<b>26</b>
8.1 Sementin valmistus .....	26
8.2 Lämpövoimalaitos.....	28
8.3 Dimetyylikarbonaatin valmistus .....	29
<b>9. Laskenta .....</b>	<b>32</b>
9.1 Sementti.....	32
9.2 Voimalaitos .....	34
9.3 Dimetyylikarbonaatti.....	36
<b>10. Johtopäätökset .....</b>	<b>38</b>
<b>11. Lähdeluettelo.....</b>	<b>40</b>

## 1. Symboli- ja lyhenneluettelo

E	Kokonaispäästöt
$e_i$	Pienemmän kokonaisuuden kokonaispäästöt
$C_i$	Khk-päästöjen massa laskennan ajankohtana
$Q_i$	Energian/sähkön kulutus laskennan aikana
$F_i$	Khk-päästökerroin
LCV	Lämpöarvo polttoaineelle
$O_i$	Hapetuskerroin polttoaineelle i
$q_{mi}$	Massavirta taserajapinnan läpi kohdassa i
$m_i$	Kappaleen tai aineen massa
$CO_2$	Hiilidioksidi
$CaCO_3$	Kalsiumkarbonaatti
CaO	Kalkki
DMC, $(CH_3O)_2CO$	Dimetyylikarbonaatti
$CH_3OH$	Metanoli
CO	Hiilimonoksidi
$CH_4$	Metaani

LCA	Elinkaariarviointi
GRI	Maailmanlaajuinen raportointi aloite (Global Reporting Initiative)
AIChE	Amerikkalaisten kemian insinöörien instituutio(American Institute of Chemical Engineers)
SI	Kestävyys indeksi (Sustainability Index)
RED II	Uusiutuvan energian direktiivi
VTT	Valtion teknillinen tutkimuskeskus
CHP	Sähkön ja lämmön yhteistuotanto (Combined heat and power)
khk	Kasvihuonekaasu

## 2. Johdanto

Ympäristön kuormitus on nykyisin yleinen puheenaihe. Se herättää paljon huolta ja nostaa esille erilaisia mielipiteitä, kun tarkastellaan esimerkiksi ilmakehän hiilidioksidimäärän jatkuvaa kasvamista. Vuosien 2009–2018 aikana hiilidioksidipäästöt ovat nousseet ilmakehässä 2,3 ppm per vuosi (NOAA 2020). Ympäristöongelmat ovat muokanneet ihmisen tapaa ajatella, miten ympäristön hyvinvointi otetaan huomioon arjen toiminnoissa, esimerkiksi ruokavaliassa, veden ja sähkön käytössä ja jätteiden lajittelussa. (Ali et al. 2020) Ekologinen ajattelutapa näkyy myös nykypäivän teollisuudessa. Teollisuus on yksi merkittävimmistä päästöjen tuottajista, mikä on laittanut yritykset pohtimaan uudestaan tulevaisuuden strategiansa. Tuotanto- ja valmistusprosesseja on jouduttu muokkaamaan vähemmän ympäristöä kuormittavaan muotoon, jotta niistä voidaan saada nykyisten vaatimusten mukaisia. Näistä esimerkkeinä ovat muun muassa uusiutuvien energialähteiden kehittäminen, jäteveden ympäristöä haittaavien aineiden käsitteleminen ja hiilidioksidin geologinen talteenotto.

Kemianteollisuus on tällä hetkellä yksi teollisuuden merkittävin päästöjen tuottaja. Kemianteollisuudessa on useita tuotantoprosesseja, joissa prosessin sivutuotteena syntyy hiilidioksidipäästöjä esimerkiksi sementin tai vedyn valmistuksessa (Tilastokeskus 2020). Kemianteollisuudessa valmistetaan kemiallisesti tuotteita, esimerkkinä tuotannosta on petrokemian tuotanto ja maali- ja väritysteollisuus (Kemianteollisuus ry 2021). Kemianteollisuudella on merkittävä vaikutus myös muiden teollisuuden alojen tulevaisuuden strategiassa, jolloin kemianteollisuus on tärkeässä roolissa ympäristöä kuormittavien ongelmien ratkaisussa. Kemianteollisuuden päästöt koostuvat muun muassa suorista tuotantoprosessin sivutuotteina tai polttoaineen polttamisesta syntyvistä päästöistä ja epäsuorista päästöistä esimerkiksi energiankulutuksesta (Chen et al. 2019). Näissä prosesseissa syntyvät päästöt ovat välillä välttämättömiä, minkä vuoksi ympäristöongelmien ratkaiseminen on haastavaa.

Teollisuuden tuotantoprosessien kestävyys määrittämiselle on kehitetty monia työkaluja ja laskentamenetelmiä, joilla voidaan arvioida prosessin vahvuuksia, kehityskohteita ja kannattavuutta. Kestävyys arvioiminen on hyvin laaja kokonaisuus, joka koostuu useasta osa-alueesta. Ilmastovaikutus on yleensä yksi osa-alue näissä määrittämissä. (Gibson et al. 2012)

Valmistettavan tuotteen hiilijalanjäljen ilmastovaikutusta tarkastellaan yleensä sen koko elinkaaren ajalta (Muthu 2021). Laskenta voi tämän takia osoittautua monimutkaiseksi ja haastavaksi, jos esimerkiksi yritetään kehittää kokonaan uutta prosessia.

Tämän työn tarkoituksena on kehittää yksinkertainen laskentamenetelmä, jolla voidaan arvioida esimerkiksi jonkin tietyn valmistusprosessin ilmastokuormaa. Työssä on tehty kirjallisuuskatsaus olemassa olevista laskentamenetelmistä liittyen teollisuuden kannalta tärkeiden valmistus- ja tuotantoprosessien hiilijalanjälkeen. Tarkoituksena oli tehdä muutamia esimerkkilaskuja erilaisille prosesseille näillä menetelmillä ja verrata niistä saatuja tuloksia toisiinsa ja olemassa oleviin tilastoihin.

Työn tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

- Mitä eri laskentamenetelmiä voidaan käyttää hiilijalanjäljen määrittämiseen?
- Miten nämä kyseiset menetelmät toimivat ja mitä laskentaan tarvittavia tietoja pitää olla tiedossa?
- Miten laskettujen indeksien käyttäminen vertautuu olemassa oleviin tilastoihin ja miten uskottavia tulokset ovat?

Työtä on rajattu siten, että työssä tarkastellaan hiilijalanjälkeä teollisuuden näkökulmasta. Laskennan yksinkertaistamiseksi teollisuuden päästölaskut rajautuvat valmistus- ja tuotantoprosessien tasolle, jolloin ei huomioida esimerkiksi raaka-aineen hankinnasta tai lopputuotteen käytöstä johtuvia päästöjä.

### **3. Päästöt teollisuudessa**

Käsite päästö tarkoittaa veteen, ilmaan tai maaperään joutuvaa ihmisen toiminnasta johtuvaa suorasti tai epäsuorasti haitallista ainetta tai energiaa. Esimerkkinä näistä on ilmastolle haitalliset kasvihuonekaasut tai terveydelle haitalliset säteilyt. Myös kovaa melua voidaan pitää päästönä, vaikka sillä ei ole suoraa negatiivista vaikutusta ympäristöön. Ihmisen monilla toimintoilla on jonkinlaista vaikutusta ympäristöön. Yksinkertaisilla elämän valinnoilla, kuten

kierrättämällä ja ruokavalion valinnalla, voidaan saada omaa henkilökohtaista päästön tuottoa vähennettyä. Yksittäisen ihmisen toiminnalla ei saada suuria ympäristöllisiä parannuksia aikaan, vaan merkitykselliset päästöt syntyvät isompien kokonaisuuksien myötä. Merkittäviä ihmiskunnan päästölähteitä on esimerkiksi teollisuus, maatalous ja liikenne. Päästöjä syntyy teollisuudessa jatkuvasti tuotantoprosessin koko elinkaaren ajalta, jossa ilmasto kuormittavat kaasut ovat yleensä tuotanto- ja valmistusprosessin sivutuotteita. Päästöt syntyvät pääasiallisesti polttamalla fossiilisia polttoaineita ja sivutuotteina tietyistä kemiallisista reaktioista. (EPA 2020)

Päästöjä on monenlaisia ja niillä on erilaisia vaikutuksia ympäristöön. Yleisimpänä puheenaiheena on esimerkiksi teollisuuden tehtaiden sivutuotteena syntyvät hiilidioksidipäästöt. Hiilidioksidi on kasvihuonekaasu, joka tarkoittaa ilmaston lämpenemistä edistävää kaasua. Kasvihuonekaasuilla on lämpöä sitova vaikutus ilmakehässä, kun lämpösäteilyt heijastuvat maanpinnalta takaisin kohti avaruutta. Tämä vähentää lämmön pääsemistä ulos avaruuteen, jolloin lämpöä alkaa kertymään ilmakehään, ja aiheuttaa ilmaston keskilämpötilan nousemista. Tätä ilmiötä kutsutaan kasvihuoneilmiöksi. Ilmaston lämpenemisellä on arvioitu olevan voimakkaita vaikutuksia ilmastoon ja elämään maapallolla. Keskilämpötilan nousun lisäksi on ennustettu veden pinnan nousemista ja äärimmäisten sääilmiöiden lisääntymistä. Ilmaston lämpenemistä pidetään yhtenä ihmiskunnan suurista uhista. Hiilidioksidi on kasvihuonekaasuista yleisin ja tunnetuin, mutta kasvihuoneilmiötä aiheuttavia kaasuja ovat muun muassa metaani ja typpioksiduuli. Näillä kaasuilla on hiilidioksidiin nähden voimakkaampi kasvihuonevaikutus, mutta hiilidioksidia määrällisesti syntyy eniten. (Maslin, 2004, Smerdon & Mathez 2018)

Teollisuuden ja asutusten jätevesien kautta pääsee luonnon maaperään ja vesistöihin päästöjä. Nämä päästöt vaihtelevat riippuen päästöjen alkuperästä. Ravinteet ovat etenkin asutuksien jätevesien mukana tulevia päästöjä, joilla on vaikutusta esimerkiksi järvien rehevöitymiseen. Tämän kaltaisia aineita on esimerkiksi monet orgaaniset aineet sekä eri typen ja fosforin yhdisteet. Jätevesi voi sisältää erilaisia ympäristömyrkkyjä, varsinkin jos se jätetään käsittelemättä. Ympäristömyrkyt ovat yleensä ympäristölle haitallisia raskasmetalleja tai hyvin myrkyllisiä orgaanisia yhdisteitä. Jätevedelle on asetettu tarkat laatuvaatimukset ennen kuin se voidaan päästää takaisin ympäristöön, ja jätevesi pyritään aina puhdistamaan kaikista



mahdollisista haitta-aineista. Teollisuudessa prosesseihin pyritään lisäämään nykyään jätevedelle puhdistusjärjestelmä, jos sille on tarvetta. (Russell 2019)

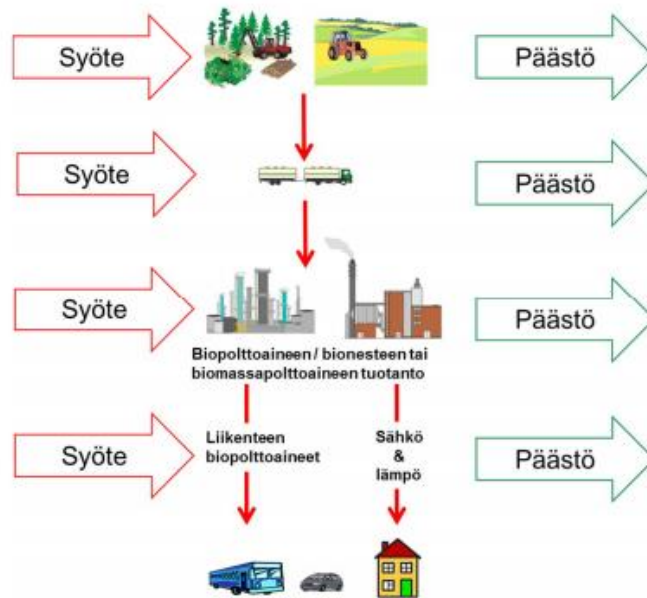
#### **4. Ilmastokuormituksen ja kestävyden määrittäminen**

Ilmasto-aiheen keskiössä on käsite hiilijalanjälki. Sen määritelmällä on hieman eroavaisuuksia, mutta pääasiallisesti sillä tarkoitetaan jonkin tuotteen tai toiminnan ekologista vaikutusta. Hiilidioksidin määrä on käytetyin tapa mitata hiilijalanjälkeä. Se esitetään yleensä ulospäästetyn hiilidioksidin massan ja ekvivalenttimassan avulla. (Wiedmann & Minx 2007) Pohjana hiilijalanjäljen määrittämiselle on sille tehdyt standardit tai muut kirjallisuudet esimerkiksi ISO-standardisarjan 14060 teokset. Näissä standardeissa käsitellään hiilijalanjäljen määrittämisen menetelmät, vaatimukset ja rajoitteet. (SFS-EN ISO 14067:2018:en)

Hiilijalanjäljen määrittämisessä olennaisena osana on ottaa huomioon tuotteen koko elinkaari. Tälle on olemassa käsite LCA, joka tulee englannin kielen sanoista life cycle assesment, jolla tarkoitetaan tuotteen tai toiminnan elinkaaren arviointia. Elinkaariarvioinnista on hyötyä, kun halutaan kartoittaa ja parantaa tuotteiden ympäristökuormitusta elinkaaren eri vaiheissa. Se myös helpottaa yritysjohton päätösten tekemistä, kun elinkaaren arviointi on jäsennetty kokonaisuus ja helposti arvioitavissa. Iso osa elinkaaren arvioinnista perustuu ISO 14040:en standardin, jossa käsitellään LCA metodologiaa. Standardin ISO 14040:en tarkoituksena on asettaa pohja, rakenne, vaatimukset ja rajoitteet elinkaaren arviointia varten. Tässä työssä ei käsitellä tuotteen koko elinkaaren kuormitusta, vaan tässä käsitellään yksinkertaisia tapoja määrittää eri prosesseille ilmastokuormitusta, jota voidaan käyttää esimerkiksi tehtaan suunnittelussa. (SFS-EN ISO 14040:2006, Muthu 2021)

Tuotantoprosessin kokonaispäästöjen tarkasteleminen sen koko elinkaaren ajalta voi olla hyvinkin haasteellista ja monimutkaista sen laajuuden takia. Kuvassa 1 on esitetty havainnollistava kuva päästöjen synnystä tuotteen koko elinkaaren aikana. Tämän takia on tärkeää määrittää tuotantoprosesseille sen päästölähteet. Pystymällä sulkemaan laskennasta ulos

kaikki päästöihin vaikuttamattomat vaiheet, voidaan saada laskentaa yksinkertaistettua huomattavasti. Laskujen tarkkuus ja todenmukaisuus kasvaa, jos saadaan kaikki päästöjä tuottavat vaiheet löydettyä.



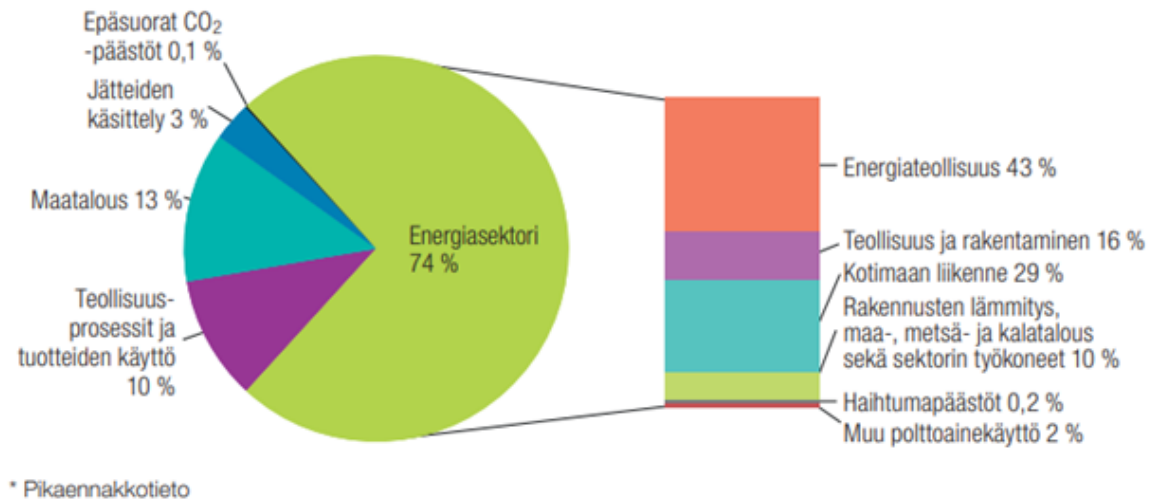
**Kuva 1.** Havainnollistava kuva kuinka päästöjä syntyy koko tuotteen elinkaaren ajalta. (Koponen & Sokka 2019)

Tuotteen elinkaaren alussa sen valmistukseen tarvittavan raaka-aineen hankinta on jo ensimmäinen mahdollinen päästölähde. Maatalouden, metsänhakuun ja kaivostyön myötä tapahtuva maanmuokkaus muuttaa maaperän hiilivarojen määrää, ja työhön käytetyt koneet kuluttavat sähköä tai polttoainetta. Tuotteen valmistusvaihe on toinen tärkeä päästölähde. Eri prosesseilla päästölähteet ovat eroavia riippuen sen tyypistä. Energiatuotannossa sen päästöt muodostuvat pääasiassa prosessin myötä syntyvissä savukaasuissa esimerkiksi hiilen tai puun poltossa. Biopolttoaineen tuotannossa pääasialliset päästölähteet ovat sähkön ja lämmön kulutus. Joissakin prosesseissa kuten sementin valmistuksessa sen päästöt koostuvat tuotannosta ja energian kulutuksesta. Tuotteen loppukäyttö on myös mahdollinen päästölähde. Esimerkiksi

biopolttoaineiden käyttö tuottaa hiilidioksidipäästöjä liikenteessä. Myös näiden eri vaiheiden välissä oleva mahdollinen logistiikka on tärkeä vaikuttaja tuotteiden hiilijalanjälkeen.

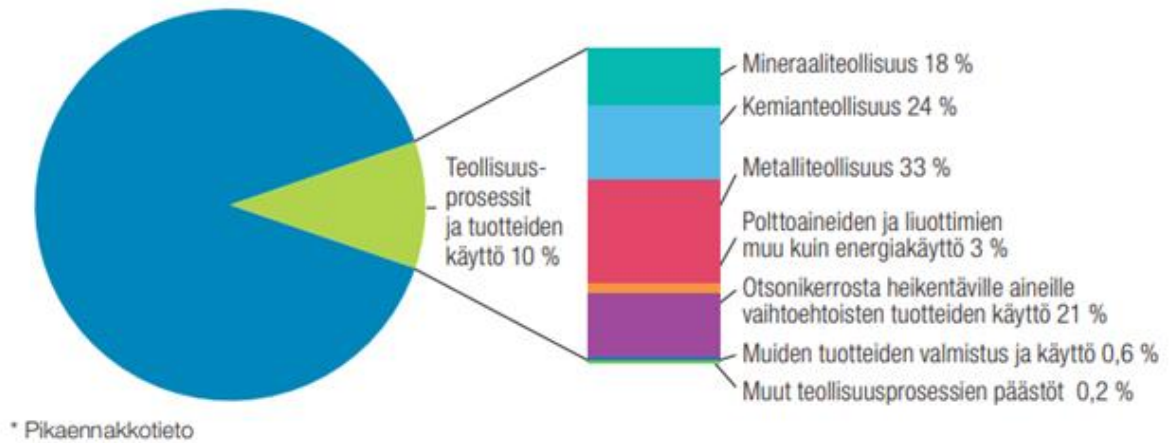
Tuotteen hiilijalanjälki voi koostua myös negatiivisista päästönlähteistä, joita ovat erilaiset hiilinielut. Esimerkkinä tästä on puut ja kasvit, jotka yhteyttämisen kautta sitovat hiilidioksidia itseensä (Metsä Group 2021). Myös teknologian myötä on kehitetty erilaisia hiilidioksidi- ja muita kasvihuonepäästöjä vähentäviä kokonaisuuksia. Muokkaamalla ympäristöä kuormittavia aineita vähemmän kuormittavaan muotoon voidaan saada prosessin päästöjä alemmaksi. Malone esittää esimerkkinä, missä metaani on hiilidioksidin nähden monikertaisesti voimakkaampi kasvihuonekaasu, mutta se voidaan pilkkoa hiilidioksidiksi ja vesihöyryksi hyödyntämällä metaanin palamisreaktiota. Polttamalla metaania vapautuu paljon energiaa. Näin päästöinä syntyvää metaania voidaan käyttää polttoaineena. (Malone 2015) Käytännön esimerkkinä tästä on katalysaattori autoissa. Katalysaattorissa muutetaan pakokaasujen haitalliset hiilimonoksidi, hiilivedyt ja typen oksidit vähemmän haitalliseen muotoon (LibreTexts 2020). Toisena vaihtoehtona on pyrkiä säilömään hiilidioksidia maanalaisiin tai merenalaisiin varastoihin. Hiilidioksidin varastointitekniikka on vielä kehitysvaiheessa, mutta se voi olla tulevaisuudessa tärkeä osa teollisuuden eri prosesseissa. Suurimmat hyötyjästä ovat esimerkiksi hiilivoimalat ja teräksen valmistus, joissa suorat hiilidioksidipäästöt ovat korkeat.

Suomessa tilastokeskuksen mukaan (kuva 2) vuonna 2019 energiasektori tuottaa 74 % Suomen päästöistä, joista 43 % on energiateollisuuden tuottama (31,8 % koko Suomen päästöistä). Energiasektorin päästöt koostuvat fossiilisten - ja biopohjaisten polttoaineiden poltosta. Muut uusiutuvat kuten tuuli- ja vesivoima ja myös ydinvoima on prosessin tasolla hiilineutraalia. (Tilastokeskus 2020)



**Kuva 2.** Suomen päästöjakauma sektoreittain vuonna 2019. (Tilastokeskus 2020)

Kuvan 3 mukaan teollisuuden ja sen tuotteiden käyttö muodostaa 10 % Suomen päästöistä. Näistä tärkeimmät päästöjen tuottajat ovat metalliteollisuus, kemianteollisuus ja mineraaliteollisuus. Tilastokeskuksen mukaan teollisuudessa teräksen, sementin, kalkin, vedyn, fosforihapon ja lasin valmistus ovat suurimmat hiilidioksidin tuottajat. Myös tiettyjen teollisuuden prosesseissa käytetyt aineet, kuten kalkkikivi, sooda ja erilaiset voiteluaineet ovat merkittäviä päästölähteitä. (Tilastokeskus 2020)



**Kuva 3.** Teollisuuden päästöjakauma vuonna 2019. (Tilastokeskus 2020)

## 5. Kestävyyden määrittämenetelmät

Hiilijalanjäljen arvioimiseen on kehitetty erilaisia laskentamenetelmiä, joilla voidaan jo nykyään melko tarkasti määrittää tuotteen, toiminnan tai jopa isojen kokonaisuuksien kuormitusta. Näitä tuloksia esitetään erilaisten indeksien avulla. Sana indeksi tarkoittaa suhdelukua, jolla voidaan kuvata jollekin arvolle suhteellista muutosta (Tilastokeskus 2021). Indeksien avulla voidaan laskea tietylle yksikölle ajankohtainen arvo, ja sitä kautta voidaan kartoittaa arvon kehitystä laskemalla useammalta jaksolta arvo. Teollisuudessa indekseillä voidaan kuvata yrityksissä niiden kestävyttä ja kannattavuutta. Tämän kaltaisten kestävyysindeksien avulla voidaan myös tehdä karkeita arvioita ja ennustuksia, miten arvo tulee kehittymään tulevaisuudessa. Tässä osiossa on esitetty muutamia menetelmiä, mitä kestävyden määrittelemisessä voidaan käyttää.

90-luvun loppupuolella Paul Anastas ja John Warner (1998) kehittivät 12 määriteltyä periaatetta vihreälle kemialle, jonka tarkoituksena on kehittää kemiallisten yhdisteiden ja kemianteollisuuden prosessien ympäristöystävällisyyttä. Nämä periaatteet ovat nykyään yleisesti käytetty pohjana kemianteollisuuden ympäristökuormaa määrittäessä. Nämä 12 periaatetta eivät yksistään sovellu kestävyden määrittämiseen, koska ne eivät sisällä

laskentamenetelmiä. Tähän vaaditaan yleensä jokin näiden periaatteiden pohjalta tehty laskentatyökalu. Taulukossa I on esitetty kaikki 12 periaatetta.

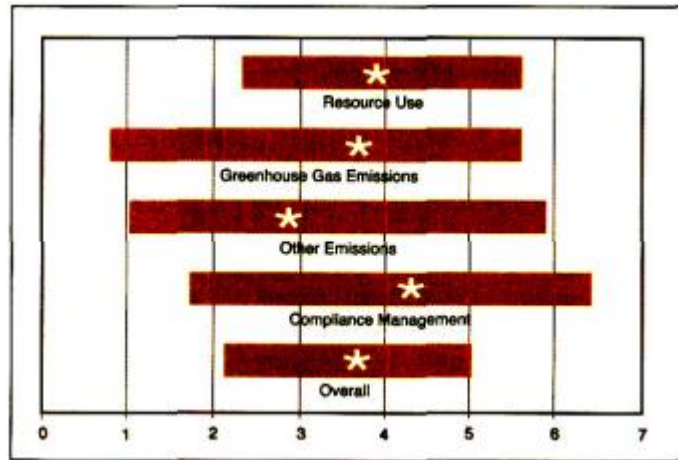
**Taulukko I.** 12 periaatetta ympäristöystävälliselle kemialle. (Anastas & Warner 1998)

<b>1. Jätteen synnyn estäminen</b>	Prosessin suunnittelu vaiheessa pitää pyrkiä estämään jätteiden syntymisen.
<b>2. Maksimoi atomieconomia</b>	Pyri maksimoimaan raaka-aineiden käyttöä, että kulumatonta raaka-ainetta ei jää.
<b>3. Vaarattomat kemikaalisynteesit</b>	Prosessissa ei saa käyttää tai tuottaa ihmiselle tai ympäristölle haitallisia aineita
<b>4. Turvallisten kemikaalien suunnittelu</b>	Suunnittele kemikaaleja, jotka ovat myrkyttömiä tai lähes myrkyttömiä.
<b>5. Turvallisten liuottimien käyttö</b>	Liuottimien ja muiden apuyhdisteiden käyttäminen tulisi välttää tai käyttää haitattomia kemikaaleja.
<b>6. Kasvata energiatehokkuutta</b>	Pyri pitämään prosessilämpötilat ja -paineet huoneenlämmössä ja normaali-ilmanpaineessa.
<b>7. Käytä uusiutuvia raaka-aineita</b>	Vältä kuluvien raaka-aineiden käyttäminen. Pyri käyttämään raaka-aineita, jotka ovat uusiutuvia.
<b>8. Vältä kemiallisia johdoksia</b>	Vältä erilaisten suoja- tai estoryhmien käyttäminen. Ne vaativat lisänä reagenssin, jotka lisäävät jätteiden syntymistä.
<b>9. Suosi katalyyttien käyttämistä</b>	Pyri käyttämään katalyyttejä, joita yleensä tarvitaan vähän toimiakseen.
<b>10. Tuotteiden hajoaminen</b>	Pyri suunnittelemaan tuotteet hajoamaan sen elinkaaren lopussa.

<b>11. Analysoi reaaliajassa</b>	Pyri hallitsemaan kemikaalisynteesiä reaaliajassa jätteiden syntymisen minimoimiseen.
<b>12. Onnettomuuksien minimoiminen</b>	Käytä kemikaaleja, joilla on pieni onnettomuusriski.

Global Reporting Initiative (GRI) on kansalaisjärjestö, joka on luonut yhteisen raportointipohjan kestävyiden määrittämiseksi. Pohja on suunniteltu helppokäyttöiseksi ja pohja on myös henkilökohtaisesti muokattavissa. Sen päivitetty versio G4 käsittelee kestävä kehityksen kolmea pääaihetta eli taloudellista, ekologista ja sosiaalista kestävyttä. GRI:ltä löytyy useita standardeja näiden aiheiden kattavaan tarkastelemiseen. (GRI 2021) Se on yksi laajimmista raportointipohjista ja kokonaisuuksista, jota voidaan nykyisin hyödyntää kestävyiden määrittämiseksi. Se soveltuu parhaiten mittaamaan yritysten kestävyiden tehokkuutta, mutta uusien prosessien kehittämiseen sitä on hyvin vaikea tai jopa mahdotonta hyödyntää sen vaatiessa valtavasti tietoa.

Amerikan kemiantekniikan insinöörien instituutio on kehittänyt kestävyysindeksin, jolla voidaan arvioida kemiallisten prosessien kestävyttä. Siinä indeksi esitetään muodossa, missä kestävyys esitetään lukuna 0–7, jossa 7 kuvaa parasta kestävyttä. Esimerkki tästä indeksin esitysmuodosta on esitetty kuvassa 4. Useampi organisaatio tai teollisuuden prosessi voidaan esittää kuvan 4 mukaisesti pylvään muodossa, jossa voidaan asettaa vertailua eri yritysten, prosessien tai niiden sisäisille eroille. Pylvään sisälle voidaan laittaa myös lukuna keskiarvon kestävydestä. Kuvassa on tehty kestävyysarviota ekologisuudelle. Palkissa olevat tähdet korvautuvat indeksin keskiarvolla. (Cobb et al. 2009)



**Kuva 4.** Esimerkki AICHe-indeksin esitysmuodosta. (Cobb et al. 2009)

AICHe-indeksissä olevat tekijät ovat nykyään yleisessä käytössä. Indeksillä on yksinkertainen, helppolukuinen ja vertailtavissa. Indeksillä on suunniteltu olemassa olevien prosessien ja tuotteiden kehittämiseksi, mutta GRI:n tapaisesti se on huono uusien prosessien valmistamiselle. Indeksissä käytetyt tekijät kestäväyydelle ovat seuraavat (Cobb et al. 2009):

- Strateginen sitoutuminen
- Kehitystyö
- Ekologisuus
- Turvallisuus
- Lopputuotteen taloudenhallinta
- Sosiaalinen vastuu
- Arvoketjun hallinta

Kestävyden määrittämiseksi on tehty lukuisia menetelmiä, joissa on paljon samankaltaisuuksia tässä luvussa esiteltyjen menetelmien kanssa. Ongelmana yleisesti näissä menetelmissä on, että ne ovat suhteellisen monimutkaisia ja laajoja, jolloin yksinkertaisia ja nopeita arvioiteja on vielä vähän käytössä.



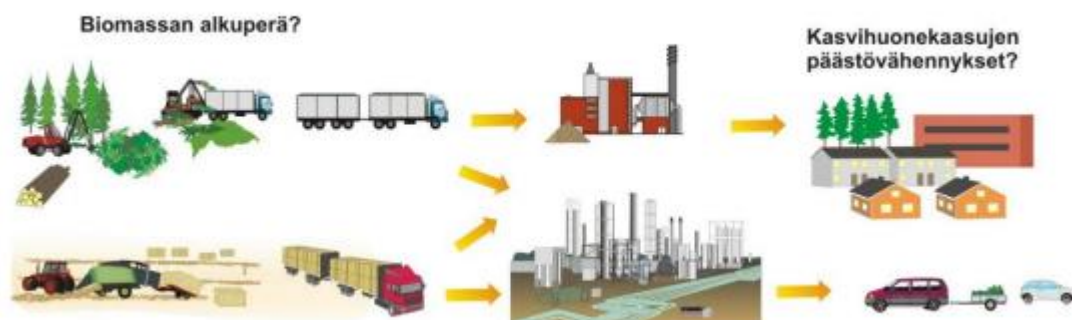
## 6. Laskentamenetelmien esittely

Työssä oli tarkoituksena etsiä erilaisia laskentamenetelmiä määrittämään teollisuuden eri prosessien ilmastokuormaa. Tässä osiossa on esitetty työssä käytetyt menetelmät, lajiteltu ne omiin luokkiinsa ja muokattu työn rajauksien mukaiseksi.

### 6.1 REDII-direktiivi

REDII-direktiivi on Euroopan komission asettama vuonna 2018 voimaan tullut uusiutuvaa energiaa koskeva direktiivi, jossa tärkeänä osana on uudet menetelmät ja tavoitteet uusiutuvan energian suhteen vuosille 2021–2030. Pääasiallinen tavoite on kasvattaa jäsenmaiden uusiutuvien energianlähteiden osuutta valtion energiantuotannossa. Direktiivissä oli myös tehty päivityksiä kestävyyskriteereihin koskien biopohjaisia polttoaineita. (Koponen & Sokka 2019).

REDII-direktiivissä tärkeässä roolissa on biomassan ja uusiutuvan energian kestävyyskriteerit. Kriteerien tarkoituksena on varmistaa biopohjaisten raaka-aineiden käytön kasvattaminen. VTT-raportin mukaan kestävyyskriteerit koskevat REDII:ssa nestemäisten ja kaasumaisten biopolttoaineiden käyttöä, ja kiinteiden, nestemäisten ja kaasumaisten biopolttoaineiden avulla tuotettua sähkö-, lämpö- ja jäähdytysenergiaa. Kestävyyskriteerit koskevat koko bioenergian tuotantoketjua. Kuvassa 5 on esitetty havainnollistava kuva biopohjaisten polttoaineiden elinkaaresta ja kestävyyskriteereistä. Selkeitä painotettuja kohtia on tarkastella käytetyn raaka-aineen alkuperää ja mahdollisia kasvihuonekaasujen päästövähennyksiä tuotannon eri vaiheissa. (Koponen & Sokka 2019).



**Kuva 5.** Biopohjaisten polttoaineiden yksinkertaistettu elinkaari, johon on asetettu biopohjaisten polttoaineiden kestävyyskriteerien pääpainotukset. (Koponen, Sokka 2019)

REDII-direktiivissä käsitellään tupla- ja moninkertaisia laskentamalleja, joiden tarkoituksena on antaa enemmän painoarvoa uusiutuvien raaka-aineiden käytölle. Direktiivin mukaan voidaan esimerkiksi biopohjaisten polttoaineiden ja biokaasun sisältämää energiasisältöä pitää kaksinkertaisena liikenteessä. VTT-raportin mukaan Suomi on päättänyt luopua tästä laskentamenetelmästä biopolttoaineiden suhteen vuodesta 2021 alkaen, minkä tarkoituksena on kehittää biopolttoaineiden käyttöä liikenteessä. (Koponen & Sokka 2019). Tässä työssä ei näitä laskentamenetelmiä käytetä, sillä ne huonontavat laskettujen arvojen todenmukaisuutta.

Standardissa 16214-4:2013+A1:2019:en on esitetty REDII-direktiiviä noudattavat laskentaperusteet hiilijalanjäljen määrittämiseksi. Vaikka tämä standardi on tehty biopohjaisten materiaalien laskentaa varten, voidaan sen osia käyttää päästölaskennan pohjana myös muille prosesseille. Yhtälössä (1) on esitetty kaava biopolttoaineiden kokonaispäästöjen laskentaan.

Kiinteiden ja nestemäisten biopolttoaineiden kokonaispäästöt REDII-direktiivin mukaan (SFS-EN 16214-4:2013+A1:2019:en):

$$E = e_{ec} + e_l + e_p + e_{td} + e_u - e_{sca} - e_{ccs} - e_{ccr} - e_{ee} \quad (1)$$

missä

E	kokonaispäästöt
$e_{ec}$	raaka-aineiden keräämisestä ja viljelystä johtuvat päästöt
$e_l$	päästöt maanmuokkauksesta johtuvista hiilivarantojen muutoksista
$e_p$	päästöt valmistus- tai tuotantoprosessissa
$e_{td}$	päästöt kuljetuksesta ja jakelusta
$e_u$	päästöt polttoaineen käytöstä (on nolla biopohjaisille polttoaineelle)
$e_{sca}$	on maatalouden kehittymisestä johtuva maaperän hiilikertymistä saatavat päästövähennykset
$e_{ccs}$	päästövähennykset hiilen talteenotosta ja geologisesta varastoinnista
$e_{ccr}$	päästövähennykset hiilen talteenotosta ja korvaamisesta
$e_{ee}$	päästövähennykset CHP-voimalan ylijäämästä sähköstä

Työssä on tehty rajaukset, jossa päästöjä käsitellään prosessien tasolla, jolloin siinä ei oteta huomioon raaka-aineen hankinnasta tuotettuja päästöjä tai prosessin tuotteen jatkokäytön aiheuttamia päästöjä. Tämä on tehty sillä perusteella, että laskennassa otetaan huomioon vain ne komponentit, joista prosessin valmistava yritys on täysin riippuvainen. Lisäksi tarkoituksena on myös yksinkertaistaa laskentaprosessia mahdollisimman paljon, joten tässä työssä ei

myöskään oteta päästöjä vähentäviä osia huomioon. Yhtälöä (1) voidaan muokata, että sinne jää enää vain osa, joka määrittää päästöt valmistus- ja tuotantoprosessissa. Yhtälössä (2) on esitetty muokattu versio yhtälölle (1).

$$E = e_p \quad (2)$$

Prosessin päästöt voidaan jakaa kahteen komponenttiin: itse prosessista muodostuvat päästöt ja energian kulutuksesta syntyvät päästöt. Prosessissa syntyvät päästöt ovat pääasiassa savukaasujen mukana kulkeutuvat hiilidioksidipäästöt. Prosessien ylläpitämiseen joskus vaaditaan suuret määrät sähköä, jonka tuottaminen kuormittaa ympäristöä.

## 6.2 Energian kulutus

Prosesseissa on energian käyttö lähes välttämätöntä. Sen käytön määrä vaihtelee paljon eri prosessin välillä. Myös energian käytön tavat vaihtelevat. Sitä voidaan esimerkiksi tuottaa polttoaineita polttamalla lämpöä vai otetaanko energia suoraan sähköverkosta. Näiden prosessien identiteettierojen takia laskentamenetelmät vaihtelevat hieman eri prosessien välillä. Standardissa 16214-4:2013+A1:2019:en on käsitelty energian kulutuksen ympäristökuormaa. Yhtälössä (3) on esitetty energian käytölle päästöjen laskennan yleiskaava. Yhtälössä (4) on esitetty päästötasapaino energian käytölle.

Yleinen yhteys khk-päästöjen ja energian käytön kanssa (SFS-EN 16214-4:2013+A1:2019:en):

$$C_i = Q_i * F_i \quad (3)$$

missä

$C_i$	khk-päästöjen massa laskennan ajankohtana
$Q_i$	energian/sähkön kulutus laskennan aikana
$F_i$	khk-päästökerroin

Yleinen khk-päästötasapaino energian käytölle ja viennille (SFS-EN 16214-4:2013+A1:2019:en):

$$C_n = C_{if} + C_{ih} + C_{ieg} + C_{int} - C_{ex} \quad (4)$$

missä

$C_n$	nettopäästöt energian käytöstä ja viennistä
$C_{if}$	polttoaineen käytöstä johtuvat päästöt
$C_{ih}$	päästöt lämmönkäytöstä
$C_{ieg}$	päästöt sähköverkosta otetusta sähköstä
$C_{int}$	päästöt omien raaka-aineiden poltosta tai prosessin sisäisestä virrasta
$C_{ex}$	päästövähennykset viedystä CHP-sähköstä

Yhtälöä (4) voidaan muuttaa leikkaamalla ja yhdistämällä osia yleisemmälle tasolle. Yhtälö koostuu sähköön ja lämpöön liittyvistä komponenteista, ja ne voidaan kaikki yhdistää isommiksi kokonaisuuksiksi. Sähköverkosta otettu energia ( $C_{ieg}$ ) ja CHP-tuotannossa ylijäänyt sähkö ( $C_{ex}$ ) muodostavat sähkön käytön kokonaispäästöt, joka esitetään tunnuksella  $C_s$ . Loput yhtälön (4) osat liittyvät kaikki lämmöntuottamiseen ja kuluttamiseen. Nämä voidaan yhdistää suuremmaksi kokonaisuudeksi, joka esitetään tunnuksella  $C_l$ . Yhtälössä (5) on esitetty Yhtälön (4) muokattu versio.

$$C_n = C_s + C_l \quad (5)$$

missä

$C_s$  päästöt sähkön kulutuksesta

$C_l$  päästöt lämmön tuotannosta ja kulutuksesta

Sähköenergiaa voidaan hankkia joko käyttämällä sähköverkkoa tai tuottamalla se itse. Pääasiassa sähköenergiaa hankitaan sähköverkosta, mutta on mahdollista, että prosessissa voidaan hyödyntää esimerkiksi höyryjä pyörittämään turbiinia, jolla voidaan tehdä prosessista omavarainen sähköenergian suhteen. Tällaiset osiot pitää ottaa huomioon, jos määritetään sähkölle päästöjen määrää. Itsetuotettu sähkö on päästötöntä, jos se on tuotettu höyry- tai kaasuturbiinin avulla. Se on tavanomaisin tapa tuottaa sähköä. Höyryn tuottaminen voi joskus vaatia polttoaineen polttamista, mistä muodostuu päästöjä. Laskennassa näitä tarkastellaan lämmöntuotannon osiossa. (Svensson et al. 2009).

Ostosähkön päästöissä vaikuttaa sen energiatuotannon lähde. On prosesseja esimerkiksi ydinvoima, tuulivoima ja vesivoima, jotka eivät itse prosessina kuluta ympäristöä. On myös prosesseja, jotka ovat merkittäviä päästön tuottajia kuten eri polttoon perustuvat voimalaitokset. Yhtälössä (6) on esitetty muodostuvat päästöt sähkönkulutuksesta.

Yhtälön (3) perusteella tehty kaava sähkön kulutuksen päästöille (SFS-EN 16214-4:2013+A1:2019:en):

$$C_s = Q_s * F_s \quad (6)$$

missä

$Q_s$  ostosähkön kulutus

$F_s$  päästökerroin sähkön käytölle

Lämmön tuotannoista yleisin on perinteinen energiarikkaan aineen polttaminen. Jokaisen polttoaineen päästöjen määrät vaihtelevat riippuen sen aineellisista ominaisuuksista ja kulutuksesta. Standardissa EN 19694-6:2016 on esitetty laskentamenetelmä polttouunin hiilidioksidipäästöille, joka on esitetty yhtälössä (7).

Kaava polton päästöille (EN 19694-6:2016):

$$C_l = Q_{pa} * LCV * F_{pa} * O_{pa} \quad (7)$$

missä

$Q_{pa}$  polttoaineen kulutus

LCV lämpöarvo polttoaineelle

$F_{pa}$  polttoaineelle olennainen päästökerroin

$O_{pa}$  polttoaineelle olennainen hapetuskerroin

### 6.3 Hiilen massatase

Hyvin yksinkertainen tapa ajatella hiilidioksidipäästöjen määrittämistä on asettaa hiilelle massatase. Sillä voidaan yksinkertaisilla massan määrittäyksillä määrittää prosessin sisään- ja ulostulovirroista hiilidioksidin massat. Prosessin mukaan hiilen massavirtoja voidaan määrittää erilaisilla menetelmillä. Lopputuotteesta tehtyjen mittausten ja kirjallisuudesta löydettyjen raaka-aine koostumusten avulla voidaan laskea syntyvän hiilidioksidin määrä, kun tiedetään sisään ja ulos menevät hiilivirrat. Hiilidioksidin syntymistä voidaan arvioida tarkastelemalla reaktioyhtälöitä, missä hiilidioksidia muodostuu. Yhtälössä (8) on esitetty yleinen määritelmä massataseelle, ja yhtälöissä (9) ja (10) on esitetty yksinkertaistetut muodot yhtälöstä (8).

Massataseen yleinen määritelmä on:

$$\sum_{i=1}^I q_{mi} = \frac{d}{dt} \sum_{s=1}^S m_s \quad (8)$$

missä

$q_{mi}$  massavirta taserajapinnan läpi kohdassa  $i$

$m_s$  tasetilavuudessa oleva massa

Hiilen massatase, josta on eroteltu ulostulovirroista hiilidioksidi:

$$\frac{dm}{dt} = q_{m,i} - q_{m,u} - q_{m,CO_2} \quad (9)$$

missä

$q_{m,i}$  prosessiin sisään tuleva hiilen määrä

$q_{m,u}$  prosessista ulostuleva hiilen määrä (miinus hiilidioksidi)



$q_{m, CO_2}$  hiilidioksidin ulostulo

Tätä voidaan yksinkertaistaa tekemällä oletuksen, että massanmuutos  $dm/dt$  ei muutu. Lisäksi voidaan supistaa ajat massavirroista pois ja ratkaistaan hiilidioksidin massa. Nämä muutokset on esitetty yhtälössä (10).

$$m_{CO_2} = m_{m,i} - m_{m,u} \quad (10)$$

#### 6.4 Laskuihin tarvittavat kertoimet

Päästökertoimena pidetään sähköntuoton ominaispäästöjä suhteutettuna tuotettuun energiamäärään. Päästökerroin määritetään sähkön kulutukselle käyttämällä keskiarvoa edellisten vuosien kulutuksesta. Vuodelle 2020 ostosähkölle oleva päästökerroin on 141 g CO<sub>2</sub>/kWh (Motiva 2021).

Tilastokeskus on julkaissut excel-tiedoston, jossa on esitelty eri polttoaineille päästökertoimet, hapetuskerroimet ja teholliset lämpöarvot. Taulukossa II on esitetty työssä käytetyt polttoaineiden kertoimet. (Tilastokeskus 2021)

**Taulukko II.** Työssä käytettyjen polttoaineiden kertoimet. (Tilastokeskus 2021)

<b>Polttoaine</b>	<b>Päästökerroin, [t/TJ]</b>	<b>Tehollinen (alempi) lämpöarvo [GJ/t tai m<sup>3</sup>]</b>	<b>hapetuskerroin</b>
Kivihiili	93,1	24,8	0,99
Maakaasu	55,3	36,4	1,0
Puupelletti	112,0	17,0	0,99

## **7. Materiaalit ja menetelmät**

Tässä työssä on laskettu esimerkkilaskuja eri valmistusprosesseille käyttäen edellisessä kappaleessa esitettyjä yhtälöitä. Työn esimerkkiprosesseina ovat sementin valmistusprosessi, lämpövoimalaitos ja dimetyylikarbonaatin valmistusprosessi. Laskettuja tuloksia vertaillaan toisenlaisilla menetelmillä laskettuihin tuloksiin samoista prosesseista, joista tehdään päätelmiä yksinkertaisten laskelmamenetelmien toimivuuteen ja todenmukaisuuteen.

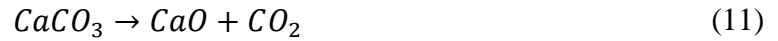
## **8. Prosessien esittely**

Työn tarkoituksena oli tehdä esimerkkilaskentoja käyttäen eri valmistus- tai tuotantoprosesseja. Tässä luvussa esitellään työssä käytetyt prosessit. Työn esimerkkiprosesseina toimivat sementin valmistusprosessi ja yksinkertainen voimalaitos. Nämä prosessit ovat merkittäviä päästöjä tuottavia prosesseja, jonka takia nämä on valittu tähän työhön. Lisäksi työssä tarkastellaan dimetyylikarbonaatin valmistusprosessia.

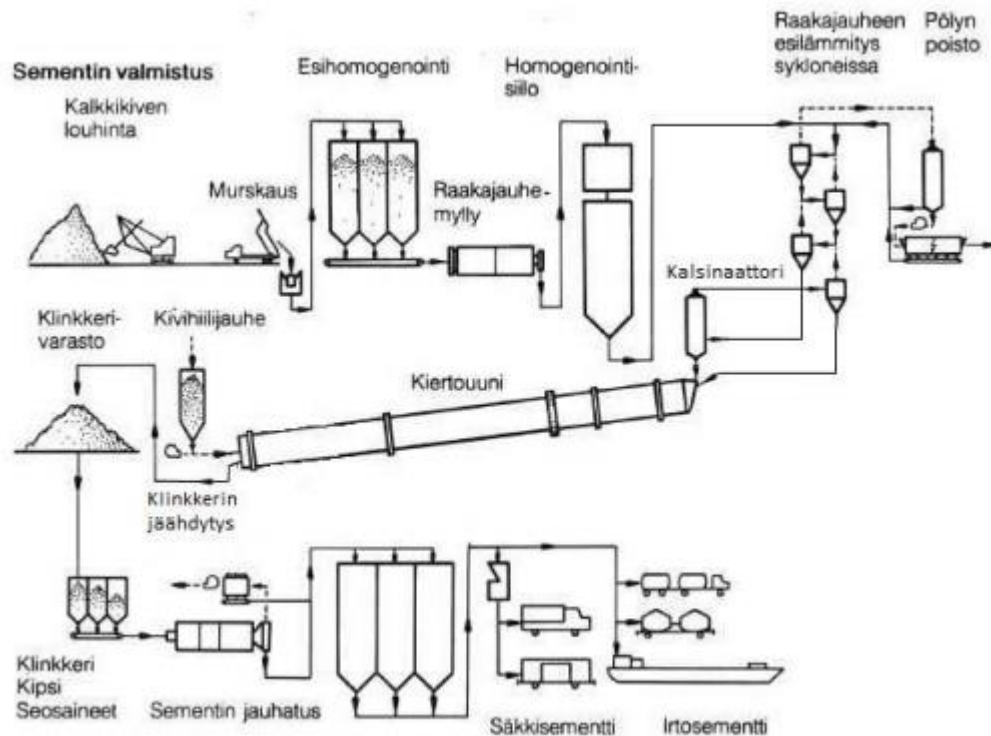
### **8.1 Sementin valmistus**

Sementti on kalkkikivestä valmistettu betonin raaka-aine. Betoni on yleisesti käytetty infra- ja rakennusteollisuuden materiaali. Sementtiä valmistetaan kalkkikiven pääosaisesta komponentista kalsiumkarbonaatista ( $\text{CaCO}_3$ ). Kalkkikiven louhinnan, murskauksen ja jauhatuksen jälkeen jauhe esilämmitetään sykloneissa käyttäen prosessista syntyviä savukaasuja, jolla saadaan kalsiumkarbonaatti hajotettua kalkiksi ( $\text{CaO}$ ) ja hiilidioksidiksi ( $\text{CO}_2$ ). (Alsop & Post 1998) Yhtälössä (11) on esitetty reaktioyhtälö kalkkikiven poltolle.

Kalsiumkarbonaatin kuumennuksen reaktioyhtälö:



Esilämmityksen jälkeen kalkki kuljetetaan kiertouuniin, jossa kalkki ja muut tarvittavat oksidit kuten pii-, rauta- ja alumiinioksidi reagoivat keskenään ja muodostavat sementtiklinkkeriä. Sementtiklinkkeristä valmistetaan sementtiä jauhamalla se ja lisäämällä vettä siihen. Kuvassa 6 on esitetty sementin valmistuksen eri vaiheet.



**Kuva 6.** Sementin valmistuksen kaaviokuva. (Laulaja 2019)

Sementin valmistus on Suomessa yksi merkittävimmistä päästölähteistä teollisuudessa. Sen suurin päästölähte on prosessille välttämätön klinkkerikiertouuni. Kalsiumkarbonaatin

kuumennuksessa syntyy väistämättä hiilidioksidia reaktion sivutuotteena. Lisäksi uunia kuumennetaan polttamalla polttoainetta esim. kivihiiltä, jotta saadaan klinkkerin muodostumisreaktiolle olennainen +1400 °C lämpötila. Lisäksi prosessin muut vaiheet kuluttavat myös sähköä. (Finnsementti oy 2020)

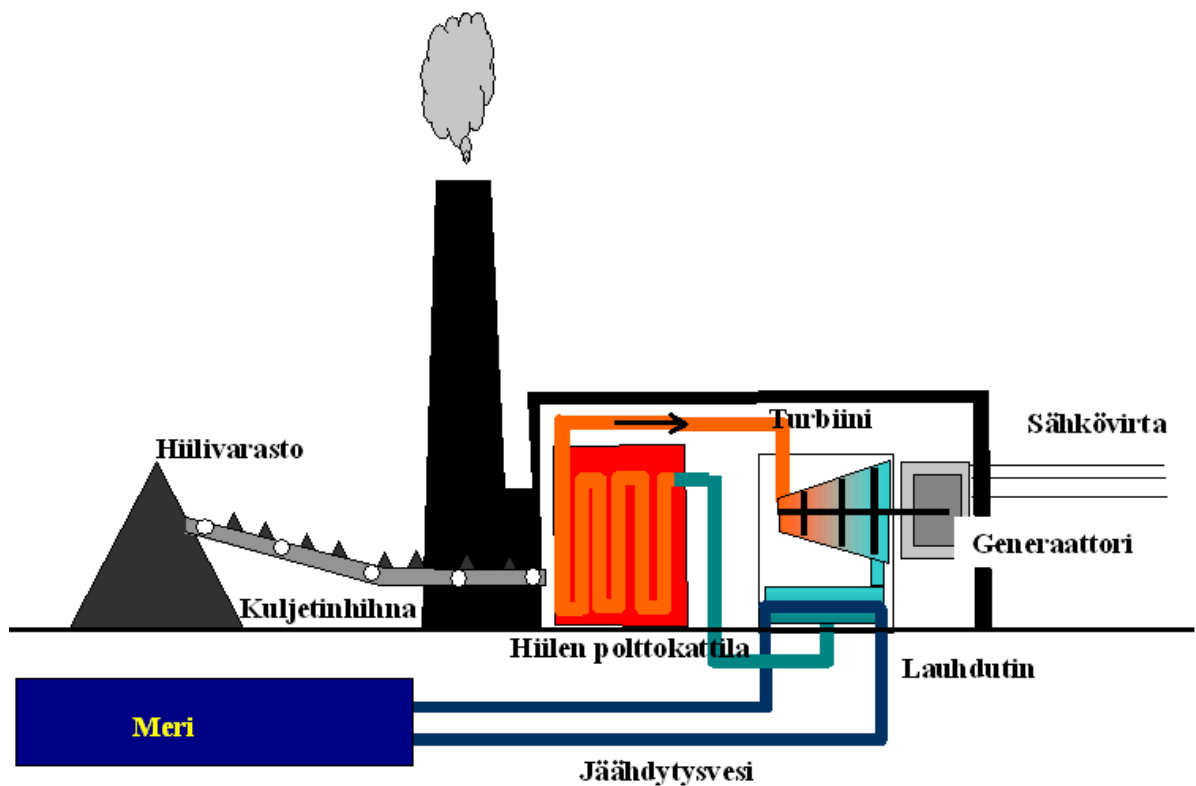
## 8.2 Lämpövoimalaitos

Lämpövoimalaitokset ovat energiateollisuuden energiantuotantoprosessi. Lämpövoimalaitoksen tarkoituksena on tuottaa sähköä ja lämpöä polttamalla polttoainetta. Polttoaineena toimii yleensä jokin fossiilinen polttoaine esimerkiksi kivihiili, mutta teoriassa voidaan käyttää polttoaineena myös mitä tahansa helposti palavaa ja runsaasti energiaa sisältävää ainetta. (Flynn 2003) Maakaasu, turve ja puuaines ovat yleisesti käytettyjä polttoaineita voimalaitoksissa. Ydinvoimalaitos on myös yksi lämpövoimalaitostyyppi, vaikka siinä ei polteta mitään polttoainetta.

Lämpövoimalaitoksia on kahden tyyppisiä: perinteinen lauhdevoimalaitos ja uudempi vastapainevoimalaitos. Lauhdevoimalaitoksen tarkoituksena on tuottaa vain sähköä, kun taas vastapainevoimalaitoksissa tuotetaan sekä sähköä että lämpöä. Lämpövoimalaitoksissa poltetun polttoaineen avulla höyrystetään kattilassa kiertoainetta (yleensä vesi), joka kuljetetaan pyörittämään turbiinia, johon sisälletty generaattori muuttaa sen mekaanisen energian sähköksi. Lauhdevoimalaitoksessa turbiinista ulostuleva kaasumainen kiertoaine jäädytetään lauhduttimessa ja se kulkeutuu takaisin kattilaan höyrystettäväksi. Lauhdutusnesteenä voidaan käyttää järvivettä, jolloin sähköä ei tarvitse käyttää lämpötilan ylläpitämiseen. (Flynn 2003) Vastapainevoimalassa turbiinista ulostulevaa höyryä voidaan hyödyntää lämmöntuotannossa. Höyryä voidaan käyttää lämmittämään kaukolämpöverkostossa kiertävää vettä tai hyödyntää teollisuuden prosessilämpönä. (Gvozdenac et al. 2017)

Lämpövoimalaitokset ovat ydinvoimaa lukuun ottamatta merkittäviä päästöjen tuottajia. Fossiilisten polttoaineiden polttaminen syöttää suuria määriä kasvihuonekaasuja ilmastoon, ja varsinkin hiilivoimalat ovat globaalisti yksiä eniten saastuttavia prosesseja. Biopohjaisten

polttoaineiden käyttäminen saa lämpövoimalaitoksien hiilijalanjälkeä alhaisemmaksi. Puiden ja kasvien hiilidioksidia sitovat vaikutukset aiheuttavat negatiivisia päästöjä, jotka neutraloivat itse energiatuotantoprosessin tuottamia päästöjä. Raaka-aineena biopohjaiset polttoaineet ovat kestävämpiä verrattuna kuluviin fossiilisiin polttoaineisiin. (Gerssen-Gondelach et al. 2014) Mahdolliset hiilidioksidin talteenottomenetelmät voivat olla tulevaisuudessa parannus lämpövoimalaitoksille.



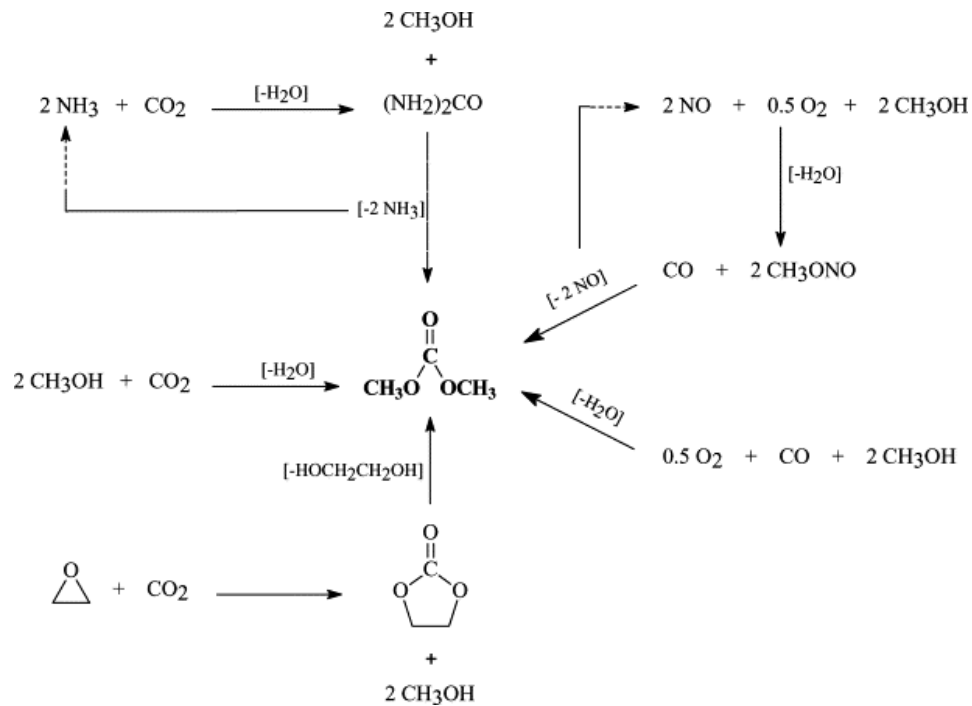
**Kuva 7.** Esimerkki hiilivoimalasta. (Kemia.ovh 2021)

### 8.3 Dimetyylikarbonaatin valmistus

Dimetyylikarbonaatti (DMC,  $(\text{CH}_3\text{O})_2\text{CO}$ ) on orgaaninen yhdiste, joka on väritön neste huoneenlämmössä. Se on erittäin helposti syttyvä ja sillä on tunnusomainen haju. (ICSC: 1080).

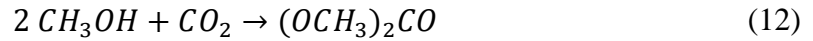
Ainetta on suunniteltu käytettäväksi polttoaineisiin lisäaineena. DMC:n hyvinä ominaisuuksina ovat sen hyvä syttyvyys ja se on lähes myrkytöntä (Keller et al. 2009).

Dimetyylikarbonaattia voidaan valmistaa usealla eri valmistusmenetelmällä. Kaikissa synteeseireiteissä käytetään metanolia pohjana dimetyylikarbonaatin valmistukselle. Nykyisin käytetyin on menetelmä, missä käytetään hiilimonoksidia (CO), metanolia ja happea tuottamaan DMC:tä (Delledonne et al. 2001). Valmistusprosesseissa on mahdollisuutta käyttää myös hiilidioksidia raaka-aineena. Tämä on näistä menetelmistä kiinnostavin, kun sillä on potentiaalia olla hiilineutraali tai jopa hiilenegetiivinen prosessi. Tässä työssä tarkastellaan suoraa synteeseireittä hiilidioksidista ja metanolista. Yhtälössä (12) on esitetty reaktioyhtälö DMC:n valmistukselle metanolista ja hiilidioksidista.

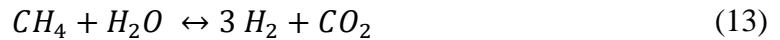


**Kuva 8.** Dimetyylikarbonaatin eri synteeseireitit. (Delledonne et al. 2001)

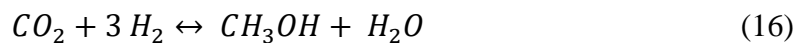
Yhtälö esittää miten dimetyylikarbonaattia voidaan valmistaa suoraan hiilidioksidista.



Metanoli on dimetyylikarbonaatin valmistuksen pääraaka-aine. Sitä voidaan valmistaa usealla eri tavalla, mutta sen valmistaminen maakaasusta on tyypillisin. Maakaasu on pääosin metaanista ( $\text{CH}_4$ ) koostuva kaasu. Metaani esikäsitellään vesihöyryn avulla hiilimonoksidiksi, ja se vesihöyryn avulla reagoi vielä hiilidioksidiksi. Yhtälössä (13) ja (14) on esitetty reaktioyhtälöt hiilimonoksidin ja hiilidioksidin muodostumiset metaanista. (Lerner et al. 2018)



Pääreaktorissa saadaan vetykaasu ja hiilimonoksidi reagoimaan metanoliksi, sekä hiilidioksidin tapauksessa myös vesihöyryksi. Hiilimonoksidin reaktio on merkittävämpi näistä reaktioista, ja hiilidioksidia jää yleensä reagoimatta. Yhtälöissä (15) ja (16) on esitetty hiilikaasujen reaktiot metanoliksi. (Lerner et al. 2018)



Prosessin ulostulovirtoihin yleensä jää hiilidioksidia, joka on merkittävin päästöjen tuottaja metanolin valmistuksessa. Jonkin verran prosessi kuluttaa sähköä, mutta siitä johtuvat päästöt ovat aika pienet.

## 9. Laskenta

Tässä osiossa on esitetty laskennat prosessien ilmastokuormalle käyttäen tässä työssä esitettyjä yhtälöitä. Laskujen tuloksia on vertailtu kattavammilla laskentamenetelmillä esimerkiksi LCA:lla laskettuihin tuloksiin.

### 9.1 Sementti

Sementin valmistuksessa päästöt voidaan jakaa kolmeen pääosaan. Kalkkikiven lämmityksessä syntyy hiilidioksidia, jonka määrä voidaan määrittää suoraan tarkastelemalla reaktioyhtälöä ja laskemalla saatu hiilidioksidin määrä kulutetun kalkkikiven määrästä. Prosessissa myös kulutetaan energiaa, mikä jakautuu sähkönkulutukseen ja kalkkiuunin lämmittämiseen. Ne voidaan laskea käyttämällä yhtälöitä (6) ja (7), kun tiedetään tarvittavat kertoimet sähkölle ja käytetyille polttoaineille. Polttoaineena yhtälöissä oli käytetty kivihiiltä. Kokonaispäästöt sementin valmistusprosessille on esitetty yhtälössä (17), ja yhtälössä (18) on esitetty sementtiprosessin energiankulutus.

Sementtiprosessin päästöt:

$$E = m(CO_{2eq}) + C_n \quad (17)$$

missä

$m(CO_{2eq})$  prosessissa syntyvät hiilidioksidipäästöt

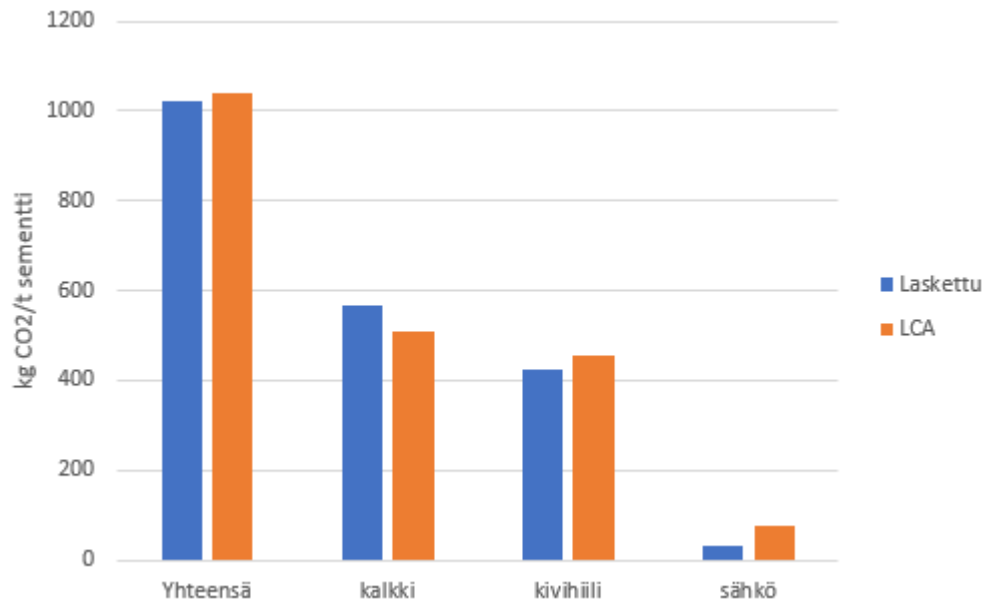


Sementtiprosessin energiankulutus:

$$C_n = C_s + C_{l, kh} \quad (18)$$

Kalkin poltosta syntyvät päästöt laskettiin reaktioyhtälön (11) mukaan kun tiedetään raaka-aineen kulutus ja raaka-aineen kalsiumkarbonaattipitoisuus. Berhane Handiso (2015) oli diplomityössään laskenut LCA-menetelmällä etiopialaisen sementtitehtaan ilmastokuormaa. Tässä työssä oli laskettu Handison käyttämällä alkuarvoilla ilmastokuormaa, ja tuloksia vertailtiin keskenään. Kalkkikiven kalsiumkarbonaattipitoisuus on n. 78 % ja tonni sementtiä valmistukseen tarvitaan noin 1,65 tonnia kalkkikiveä (Handiso 2015). Olettaen, että reaktio kulkee täydellisesti reaktioyhtälön mukaisesti, voidaan saada laskettua tuotetun hiilidioksidin määrä käyttäen moolimassoja. Laskennan tulokseksi kalkin poltolle saatiin 565,9 kg CO<sub>2</sub>/t sementtiä. Energian kulutukset saadaan laskettua yhtälöiden (6) ja (7) mukaisesti, kun tiedetään sähkön ja lämmitykseen käytetyn kivihiilen kulutus. Handison mukaan energian kulutukset kivihiilelle oli 4616 MJ ja sähkölle 780 MJ (Handiso 2015). Kivihiilen kulutus laskujen mukaan tuotti 425,5 kg CO<sub>2</sub>/t sementtiä ja sähkön kulutus 32,1 kg CO<sub>2</sub> /t sementtiä. Kokonaiskulutus tonnia sementin tuotantoa kohti on 1023,4 kg CO<sub>2</sub>. Tuloksista huomataan, että sementin valmistuksessa kalkin poltto ja kiertouunin polttoaineen käyttö on merkittävimmät päästöjen lähteet. Sähkön kulutuksella on hyvinkin vähäiset merkitykset sementin päästömääriin.

Kuvassa 9 on esitetty tämän työn menetelmällä lasketut tulokset vertauksena Handison laskemiin tuloksiin. Kuvasta 9 huomataan, että lasketut tulokset ovat samankaltaisia verrattuna LCA:lla laskettuihin tuloksiin. Pienet erot voivat johtua käytettyjen laskentamenetelmien eroavaisuuksista. (Handiso 2015)



**Kuva 9.** Työssä laskettujen tulosten vertailtuna Handison LCA-menetelmällä laskemiin tuloksiin.

## 9.2 Voimalaitos

Voimalaitosten päästöt määräytyvät pääasiassa polttoaineiden päästöjen mukaisesti, jolloin siitä ei esiinny muita komponentteja kuten sähkönkulutusta, tai kemiallisten reaktioiden myötä syntyviä päästöjä. Polton päästöt voidaan laskea käyttäen yhtälöä (7). Tässä työssä tarkasteltiin maakaasua ja puupellettiä voimalaitoksen raaka-aineena, joita Havukainen et al. (2018) oli käyttänyt omassa elinkaariarvioinnissa. Yhtälössä (19) on esitetty lämpövoimalaitoksen kokonaispäästöjen laskentakaava.

Voimalaitoksen päästöjen määrittämiseen käytettävä yhtälö:

$$E = C_l \quad (19)$$

Yhtälön (7) mukaan voidaan määrittää suoraan päästömäärät, kun käytetään maakaasun tilavuutena 1000 m<sup>3</sup> ja pelletin massana 1 t. Tulokset suhteutetaan voimalaitoksen tuottaman energian suhteen. Yhtälön (20) avulla voidaan laskea energian tuotanto, kun tiedetään hyötysuhde voimalaitokselle ja tarvittavat kertoimet polttoaineille.

Vuonna 2018 julkaistiin tieteellinen julkaisu ”Life cycle assessment of small-scale combined heat and power plant: environmental impacts of different forest biofuels and replacing district heat produced from natural gas”, missä tarkasteltiin maakaasun korvaamista biopohjaisilla polttoaineilla LCA-analyysin avulla. Tässä työssä on käytetty Havukaisen et al. (2018) käyttämää hyötysuhdetta 86 %. Laskujen tulokseksi saatiin maakaasulle 64,4 g CO<sub>2</sub>/MJ ja puupelletille 128,9 g CO<sub>2</sub>/MJ.

Yhtälö energian tuotannolle:

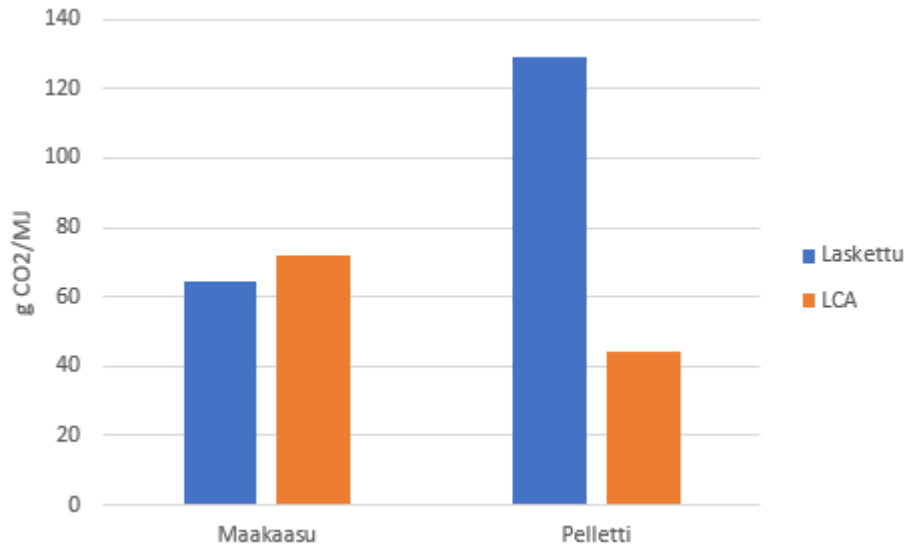
$$E_l = Q_{pa} * LCV * \eta \quad (20)$$

missä

$E_l$  Tuotettu energia

$\eta$  prosessin kokonaishyötysuhde

Kuvassa 10 on esitetty yhtälöllä lasketut tulokset verrattuna LCA:lla laskettuihin tuloksiin. Tulokset vertautuvat hyvin maakaasun kanssa, mutta biopohjaisen puupellettiin syntyy huomattava ero. Erot johtuvat puun luontaisesta kyvystä sitoa hiilidioksidia itseensä raaka-aineen kasvun aikana, joka on otettu huomioon kattavammassa laskennassa. (Havukainen et al. 2018)



**Kuva 10.** Työssä lasketut tulokset vertailtuna LCA-menetelmällä laskemiin tuloksiin.

### 9.3 Dimetylikarbonaatti

Sekä metanolin että DMC:n valmistuksessa hiilidioksidia kulkeutuu prosessin sisällä, jolloin ne on otettava laskuissa huomioon. Prosessit käyttävät sähköä energian lähteenä ylläpitämään prosessiolosuhteita. Yhtälössä (21) on esitetty kaava, millä päästöt on laskettu.

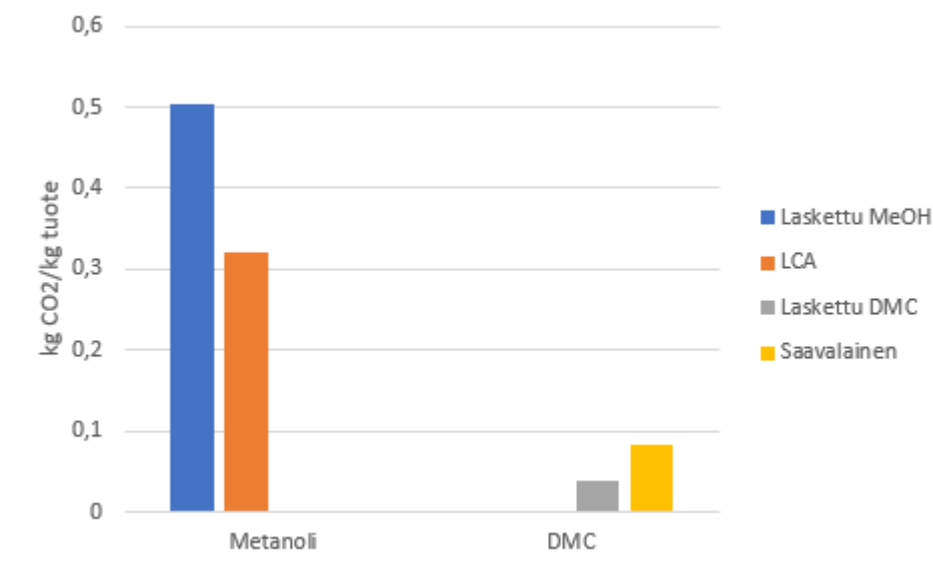
$$E = \Delta m(CO_2) + C_s \quad (21)$$

Metanolin valmistuksessa maakaasun esikäsitelyssä syntyy reaktioiden mukana hiilidioksidia. Kun tiedetään, että 1 kg metanolia kuluttaa 0,668 kg maakaasua, niin siitä voidaan laskea paljon jää reagoimatonta raaka-ainetta (Wei et al. 2021). Laskun yksinkertaistamiseksi on käytetty maakaasun moolimassana metaanin moolimassaa, ja että kaikki reagoimatta jäänyt kaasu olisi vain hiilidioksidia, jolloin kaikki hiilimonoksidi kuluu loppuun. Laskujen mukaan 1 kg tuotettua metanolia tuottaa 0,464 kg CO<sub>2</sub> päästöjä. Sähkön kulutus on metanolin valmistuksessa 0,27 kWh/kg metanolia, josta saadaan hiilidioksidipäästöjä 39,96 g CO<sub>2</sub> (Wei et al. 2021).

Yhteistuotanto hiilidioksidipäästöille on 0,504 kg CO<sub>2</sub> eli suurimmat osat päästöistä syntyy metanolin tuotannon sivuvirroista.

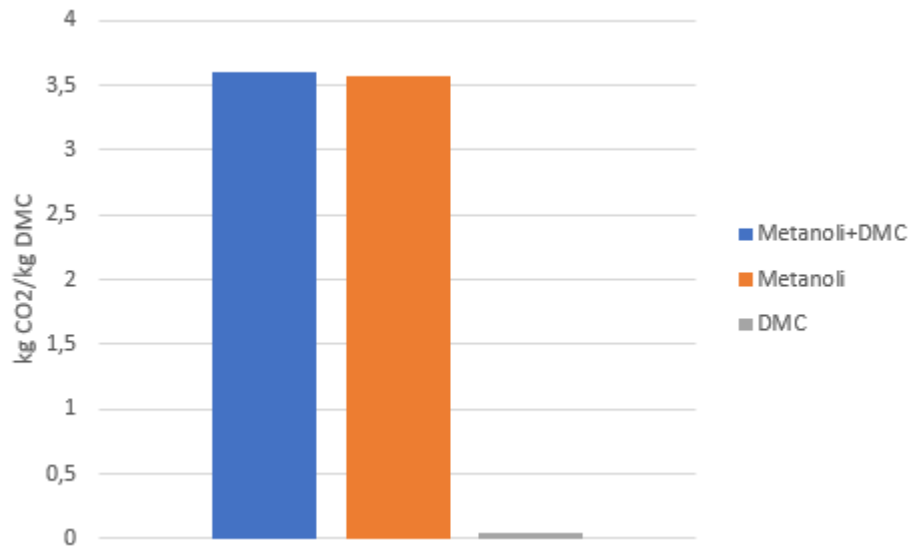
Paula Saavalainen (2020) oli diplomityössään laskenut eri DMC:n synteeseireiteille niiden kestävyyttä. Dimetyylikarbonaatin valmistuksessa Saavalainen oli raportoinut metanolin konversioksi 9,16 %, josta voidaan laskea 2 kmol alkumäärästä metanolia, että kuinka paljon kulumatonta ainetta jää (Saavalainen 2020). Kuluneen metanolin määrästä voidaan laskea reaktioyhtälön (12) mukaisesti paljon hiilidioksidia on kulunut prosessissa. Laskennoista saadaan 1 kg tuotettua DMC:tä kohti -0,489 kg CO<sub>2</sub>. Saavalaisen mukaan prosessi kuluttaa sähköä 1152,8 MJ, kun DMC:tä tuotetaan 1 kmol (Saavalainen 2020). Sähkönkulutuksen hiilidioksidipäästöiksi saadaan 0,526 kg CO<sub>2</sub>. Näin saadaan kokonaiseksi hiilidioksidipäästöiksi 0,038 kg CO<sub>2</sub>/kg DMC. Tuloksista huomataan, että prosessi on lähes hiilineutraali.

Kuvassa 11 on esitetty lasketut tulokset verrattuna edellä mainittujen töiden tuloksiin. Laskelmissa syntyy eroa, joka johtuu mahdollisesti laskentaolosuhteiden yksinkertaistamisesta. Tulokset ovat silti suuntaa antavia.



**Kuva 11.** Työssä lasketut tulokset vertailtuna kattavimpiin laskentamenetelmiin.

Työssä laskettiin myös päästöjakauma, kun tuotetaan 1 kg dimetyylikarbonaattia. Kuvassa 12 on esitetty päästöjakauma kokonaiselle dimetyylikarbonaatin valmistukselle. Kuvasta 12 huomataan, että suurimmat osat päästöistä syntyvät metanolin valmistuksen tuotannosta.



**Kuva 12.** Päästöjen jakautuminen 1 kg dimetyylikarbonaatin tuotantoon.

## 10. Johtopäätökset

Uutta teollisuuden prosessia kehittäessä on normaalia, että aiheesta tiedon määrä voi olla rajallista. Tällöin on vaikeaa pystyä tekemään ilmastonkuormitukseen ja ylipäätään kestävyteen liittyviä arvioita, kun perinteiset laskentamenetelmät vaativat paljon informaatiota. Tästä syntyy ongelma, että uusien prosessien saaminen tämän päivän ympäristökriteerien mukaiseksi on vaikeaa.

Tämän työn tarkoituksena oli kehittää yksinkertainen laskentamenetelmä hiilijalanjalan laskemiselle, millä voidaan hyvin vähäisillä tiedoilla tehdä karkeita arvioita prosessin

ilmastokuormituksesta. Työssä tehtiin esimerkkilaskuja eri teollisuuden prosesseista, ja niistä saatuja tuloksia vertailtiin kattavammin tehtyihin laskuihin.

Laskentatuloksista huomataan, että tulokset ovat suuntaa antavia ilman kattavaa elinkaarianalyysiä. Tuloksissa esiintyi hieman virhettä verrattuna toisten laskemiin tuloksiin. Virhe voi johtua laskentamenetelmien erilaisuuksista ja laskennan yksinkertaistamisesta. Merkittävimpana huomiona oli suuri ero biopohjaisen puupelletin käyttämisessä polttoaineena. Kattavassa LCA-analyysissä on otettu huomioon puun kasvun aikainen hiilidioksidin sitominen yhteyttämällä. Biopohjaisten raaka-aineiden hiilidioksidin sitominen kasvun aikana olisi mahdollinen näihin laskuihin lisätä, jos niille raaka-aineille löytyy jotain lukuarvoja, kuinka paljon esimerkiksi tonni kulutettua raaka-ainetta sitoo hiilidioksidia ilmasta sen kasvun aikana.

Tässä työssä kehitetyt laskentamallit antavat lukuja, joista voi saada suuntaa antavia tuloksia teollisuuden prosessin tuottamista hiilidioksidipäästöistä. Laskentamenetelmät eivät vaadi paljoa taustatietoa käyttämiseen, ja ajankäytön suhteen laskentamallit ovat nopeampia verrattuna esimerkiksi LCA-menetelmällä laskettuihin tuloksiin. Mallit soveltuvat parhaiten uusien tuotanto- ja valmistusprosessien suunnittelemiseen, mikäli halutaan tehdä nopeasti karkeita arvioita kehiteltävän prosessin ilmastokuormasta. Laskentamalleja voi soveltaa myös prosessin kehityksessä, jos halutaan säästää aikaa. Perinteisellä elinkaariarvioinnilla tulokset ovat todennäköisesti tarkempia ja todenmukaisempia. Biopohjaisille polttoaineille ja raaka-aineille laskentamenetelmä ei ole optimaalinen. Työssä tehdyt rajaukset olivat liian kapeat raaka-aineille, joilla on merkittävää vaikutusta ilmastoon myös teollisuuden prosessin ulkopuolella. Ongelma voidaan korjata, jos laajennetaan tarkastelualuetta. Jatkotutkimuksessa olisi hyvä ottaa huomioon biopohjaisille polttoaineille ja raaka-aineille korjaavat kertoimet tulosten tarkkuuden parantamiseksi.

## 11.Lähdeluettelo

Ali, F., Ashfaq, M., Begum, S., & Ali, A. 2020. How “Green” thinking and altruism translate into purchasing intentions for electronics products: The intrinsic-extrinsic motivation mechanism. *Sustainable Production and Consumption*. Vol 24 S. 281-291. ISSN 2352-5509

Alsop, P.A. & Post, J.W. 1998. *The Cement plant operations handbook*. 2nd ed., Portland: Tradeship Publications Ltd.

Anastas, P. T., & Warner, J. C 1998. *Green Chemistry: Theory and Practice*. Oxford University Press, New York.

Benvenuto, M. 2017. *Sustainable green chemistry*. Berliini: De Gruyter. 116 s. ISBN 978-3-11-044189-5

Chen, J., Yu, B. & Wei, Y. 2019. CO2 emissions accounting for the chemical industry: an empirical analysis for China. *Natural Hazards*. Vol 99:3. S. 1327-1343. ISSN 0921-030X

Cobb, C., Schuster, D., Beloff, B., & Tanzil, D. 2009. The AIChE sustainability index: The factors in detail. *Chemical Engineering Progress*, 105(1), 60–63.

Finnsementti Oy. 2020. *Ympäristöraportti 2020*. 30 s.

Flynn, D. 2003. *Thermal Power Plant Simulation and Control*. London: Institution of Engineering and Technology. 426 s. ISBN: 978-0-85296-419-4.

Gerssen-Gondelach, S.J., Saygin, D., Wicke, B., Patel, M.K. & Faaij, A.P.C. 2014. Competing uses of biomass: Assessment and comparison of the performance of bio-based heat, power, fuels and materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol 40. S. 964-998.

Gibson, B., Hassan, S. & Tansey, J. 2012. *Sustainability Assessment Criteria and Processes*. Hoboken: Taylor and Francis. 254 s. ISBN 1-280-47617-6

Global Reporting Iniatavite. 2021. *The global standards for sustainability reporting*. Available: <https://www.globalreporting.org/standards/> [16.4.2021]



Gvozdenac, D., Urosevic, B., Menke, C., Urosevic, D. & Bangviwat, A. 2017. High efficiency cogeneration: CHP and non-CHP energy. *Energy*. Vol 135. S. 269-278.

Handiso, B. 2015. The possibility of greenhouse gas mitigation in Ethiopian cement industry. *Diplomityö*. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Lappeenranta. 69 s.

Havukainen, J., Nguyen, M., Väisänen, S. Horttanainen, M. 2018. Life cycle assessment of small-scale combined heat and power plant: environmental impacts of different forest biofuels and replacing district heat produced from natural gas. *Journal of Cleaner Production* 172C, S. 837 - 846.

ICSC 1080. Dimetyylikarbonaatti. Geneve: Kansainvälinen työjärjestö

Keller, N., Rebmann, G & Keller, V. 2009. Catalysts, mechanisms and industrial processes for the dimethylcarbonate synthesis. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. Vol 317:1-2. S. 1-18. ISSN 1381-1169.

Kemia.ovh. 2021. Miten voimalaitos toimii?. Available: [http://www.kemia.ovh/hiilivoimala/miten\\_voimalaitos\\_toimii.htm](http://www.kemia.ovh/hiilivoimala/miten_voimalaitos_toimii.htm). [15.4.2021]

Kemianteollisuus ry. Tietoa alasta. 2021. Available: <https://www.kemianteollisuus.fi/fi/tietoa-alasta/> [20.3.2021]

Koponen, K., & Sokka, L. 2019. REDII -direktiivi: Kasvihuonekaasupäästövähennemää koskevat kestävyyskriteerit: (päivitys raporttiin VTT-R-04453-17). Espoo. VTT Technical Research Centre of Finland. 45 s. VTT Tutkimusraportti No. VTT-R-00887-19

Laulaja, M. 2019. Näytteenottolinjaston laajennus. *Opinnäytetyö*. Saimaan ammattikorkeakoulu. Lappeenranta. 31 s

Lea, F.M. & Hawlet, P. 2003. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. 4th ed. Amsterdam: Elsevier. 1057 S. ISBN 978-0-7506-6256-7

Lerner, A., Brear, M.J., Lacey, J.S., Gordon, R.L., Webley, P.A. 2018. Life cycle analysis (LCA) of low emission methanol and di-methyl ether (DME) derived from natural gas. *Fuel*. Vol 220. S. 871-878. ISSN: 0016-2361

LibreTexts. Catalytic Converters. 2020. Available: [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical and Theoretical Chemistry Textbook Maps/Supplemental Modules \(Physical and Theoretical Chemistry\)/Kinetics/07%3A Case Studies- Kinetics/7.01%3A Catalytic Converters](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Kinetics/07%3A_Case_Studies-_Kinetics/7.01%3A_Catalytic_Converters) [4.3.2021]

Malone, A. 2015. Methane: emission sources and reduction strategies. New York, USA, Nova Science Publishers. 100 s. ISBN:978-1-63482-527-6

Maslin, M. 2004. Global warming a very short introduction. Oxford: Oxford University Press. 162 s. ISBN 0-19-284097-5

Metsä Group. 2021. Available: <https://www.metsagroup.com/fi/Media/Pages/Mika-ihmeen-hiilinielu.aspx#> [4.3.2021]

Motiva. CO<sub>2</sub>-päästökertoimet. 2021. Available: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/energian kaytto\\_suomessa/co2-paastokertoimet](https://www.motiva.fi/ratkaisut/energian kaytto_suomessa/co2-paastokertoimet) [12.3.2021]

Muthu, S. S. 2021. LCA Based Carbon Footprint Assessment. 1st ed. Singapore: Springer Singapore. 110 s. ISBN 981-334-373-7

NOAA. 2020. Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide. Available: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide> [15.4.2021]

Russell, D. 2019. Practical Wastewater Treatment. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons. 455 s. ISBN 978-1-11910-0-850

Saavalainen, P. 2020. Sustainability assessment tool for the design of new chemical processes. Diplomityö. Oulun yliopisto. Oulu. 122 s

SFS-EN ISO 14040:2006. Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework. Helsinki: Suomen standardiliitto

SFS-EN ISO 14067:2018:en. Greenhouse gases. Carbon footprint of products. Requirements and guidelines for quantification. Helsinki: Suomen standardiliitto

SFS-EN 16214-4:2013+A1:2019:en. 2019. Sustainability criteria for the production of biofuels and bioliquids for energy applications. Principles, criteria, indicators and verifiers. Part 4: Calculation methods of the greenhouse gas emission balance using a life cycle analysis approach. Helsinki: Suomen standardiliitto

SFS-EN 19694-6:2016:en. 2016. Stationary source emissions. Determination of greenhouse gas (GHG) emissions in energyintensive industries. Part 6: Ferroalloy industry. Helsinki: Suomen standardiliitto

SFS-EN 197-1. Sementti. Osa 1: Tavallisten sementtien koostumus, laatuvaatimukset ja vaatimustenmukaisuus. Helsinki: Suomen standardiliitto

Smerdon, J. & Mathez, E. 2018. Climate Change: The Science of Global Warming and Our Energy Future. New York: Columbia University Press. 502 s. ISBN 9780231172820

Svensson, E., Berntsson, T. & Strömberg, A. 2009. Benefits of using an optimization methodology for identifying robust process integration investments under uncertainty—A pulp mill example. Energy Policy. Vol 37:3, S. 813-824 ISSN 0301-4215

Tilastokeskus. 2020. Suomen kasvihuonepäästöt 1990–2019. Helsinki: Tilastokeskus. 85 s. ISBN 978–952–244–660–2

Tilastokeskus. Indeksien määrittely. 2021. Available: <http://www.stat.fi/meta/kas/indeksi.html> [2.2.2021]

Tilastokeskus. Polttoaineluokitus 2021. Available: [https://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut\\_polttoaineluokitus.html](https://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html) [12.3.2021]

United States Environmental Protection Agency (EPA). Greenhouse gas emissions. 2020. Available: <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions> [4.3.2021]

Wei, W., Ching-Ting, P., Karthikeyan, V., Jo-Shu, C. 2021. Comparative life cycle assessment and economic analysis of methanol/hydrogen production processes for fuel cell vehicles. Journal of Cleaner Production. Vol 300. ISSN: 0959–6526

Wiedmann, T. & Minx, J. 2007. A Definition of 'Carbon Footprint'. Teoksessa: C. C. Pertsova (toim.), Ecological Economics Research Trends: Nova Science Publishers, Hauppauge NY, USA, 2007. S. 1-11. ISBN 1-60021-941