

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
Ympäristötekniikan koulutusohjelma

Kharlukova Larisa

PROSESSITEOLLISUUDEN SEKOITTIMEN ELINKAARIARVIOINTI

Työn tarkastajat: Professori Risto Soukka
TkL Simo Hammo

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
Ympäristötekniikan koulutusohjelma

Kharlukova Larisa

Prosessiteollisuuden sekoittimen elinkaariarviointi

Diplomityö

2015

100 sivua, 56 kuvaa, 20 taulukkoa ja 4 liitettä

Tarkastajat: Professori Risto Soukka
TkL Simo Hammo

Hakusanat: sekoitus, elinkaariarviointi, potkurisekoitin, teollisuuslaitteet.

Keywords: mixing, life cycle assessment, LCA, propeller blade mixer, industrial equipment.

Työn tavoitteena oli tehdä elinkaariarviointi (LCA) prosessiteollisuuden sekoittimelle Helmix HF-80 ja analysoida LCA-tulokset, vaikutus ilmaston lämpenemisen potentiaalin (GWP) suhteen, sekä tutkia GWP-vaikutuksen pienentämisen mahdollisuuksia. Tutkittavan sekoittimen mahdolliset käyttökohteet ovat sellu- ja paperiteollisuus, raskaiden jäteneiteiden käsittely, sekä muut teollisuusalueet, joissa käytetään tämän tyyppisiä laitteita. Työssä on muun muassa käsitelty sekoitusprosessit, sekoituslaitteiden tyypit, niiden rakenteiden ominaisuudet, käyttötarkoitus, toimintaperiaatteet, sekä sellu- ja paperi-teollisuudessa käytettävien sekoittimien yleiskatsaus. Työssä on myös kuvattu elinkaariarviointi (LCA) -menetelmä ja sen käyttötarkoitus.

Tärkeimmistä tuloksista voi mainita sen, että sekoittimen (ilman säiliötä, sähkömoottoria ja vaihteistoa) kokoelinkaaren ilmastonlämpenemisen potentiaali (GWP) on noin 750 000 kg CO₂-Equiv. Sekoittimen tuotanto- ja kierrätysaikana syntyy vain 1200 kg CO₂-Equiv. ja suurin osa 748 000 kg CO₂-Equiv. johtuu sähköenergian kulutuksesta käytön aikana. Käyttöajan vaikutusta voisi pienentää arvoksi 0 kg CO₂-Equiv. käyttämällä pelkästään uusiutuvaa energiaa. Jos tuotantoaikana käytetty energia myös korvataan uusiutuvalla energialla, niin GWP-arvo koko elinkaaren aikana laskee arvoon 1006 kg CO₂eqv., mikä on vain 0,13 % saaduista tuloksista. Suurin osa tästä arvosta liittyy sekoittimen materiaalin, tässä tapauksessa ruostumattoman teräksen tuotantoon.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
Master's Programme in Environmental Engineering

Kharlukova Larisa

Life Cycle Assessment of Process Industry Mixer

Master's thesis

2015

100 pages, 56 figures, 20 tables and 4 appendices

Examiners: Professor Risto Soukka
M.Sc. (Tech.) Simo Hammo

Keywords: mixing, life cycle assessment, LCA, propeller blade mixer, industrial equipment.

The aim of the present study was to make life cycle analysis (LCA) of the industrial mixer "Helmix HF-80" and to perform a detailed analysis of the LCA results in relation to the impact of the LCA on the global warming potential (GWP) and to investigate any potential ways to decrease this impact. The utilization area of the studied mixer includes pulp and paper industry, processing of heavy slurry liquid waste and some other industrial applications. Present work also includes summary and short review on mixing processes, different types of mixing equipment, their differences in design, operating principles and their application, as well as brief overview of mixers used in pulp and paper industry. Methodology of the LCA and the scope of its application were also described in the current study.

The key findings of the present investigation show that the GWP for the whole life cycle of the studied mixer (without a tank, an electromotor and a gearbox) is around 750 000 kg of CO₂ equivalent. It has been found that manufacturing, maintenance and decommissioning processes result in production of only 1200 kg of CO₂ equivalent, while the major portion 748 000 kg of CO₂ equivalent is due to electricity consumption during mixer operation time. Thus, the impact from the mixer's operation time can be completely eliminated if renewable sources of energy are used. If renewable sources of energy were used for the manufacturing of the studied mixer, the value of GWP would decrease to 1006 kg of CO₂ equivalent, which is only 0.13% from its initial value, as the major amount of the GWP value is due to the mixer's material production, meaning that of stainless steel in this case.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Virtor Oy -yrityksessä ja Lappeenrannan teknillisen yliopiston Ympäristötekniikan osastolla pääasiassa maaliskuu-marraskuun 2015 aikana.

Haluan kiittää Virtor Oy:n toimitusjohtajaa, Vesa Nordforsia tämän diplomityön mahdollistamisesta. Erityiskiitokset professorille Risto Soukalle sekä Simo Hammolle työni tarkastuksesta, ohjauksesta ja kannustuksesta. Työn aihe on ollut hyvin mielenkiintoinen ja työn aikana tehty oppimisprosessi elinkaariarvioinnista on ollut arvokas kokemus. Virtor Oy:n Jorma Lahtea ja yliopiston Ivan Deviatkinia haluan kiittää tiedonannoista ja kommentteista, ja kaikkiin niihin kysymyksiin vastaamisesta, joita työn tekemisen aikana ilmeni. Samaten kiitos kuuluu Kaarina Valtaselle, joka on tehnyt parhaansa diplomityön kieliasun parantamiseksi. Kiitos myös Mykolalle tuesta, kuuntelemisesta ja neuvoista. Haluaisin kiittää myös kaikkia diplomityöhön tavalla tai toisella osallistuneita. Kiitokset teille kaikille. Sydämellinen kiitos äidilleni siitä, että olet uskonut minuun ja tukenut minua kaikki nämä vuodet. En pärjäisi ilman sinua!

Turussa 26.11.2015

Larisa Kharlukova

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	9
2. SEKOITUSPROSESSIEN ERILAISET TOTEUTUSTAVAT NESTEMÄISIÄ JA KOLLOIDI AINEITA VARTEN	10
2.1 Yleistä sekoitusprosessista.....	10
2.2 Liukeneminen	12
2.3 Dispergointi, emulgointi	14
2.4 Mekaaninen sekoitus.....	14
2.5 Nesteiden ja suspensioiden barbatointisekoitus.....	16
2.6 Aineen sekoitus liikkumattomilla virta-turbulenssilaitteilla.....	19
2.7 Nesteiden kiertosekoitus	19
2.8 Mekaaniset sekoittimet.	20
2.9 Erikoissekoittimet	33
3. SEKOITTIMIEN KÄYTTÖ SELLUTEOLLISUUDESSA.....	34
3.1 Sellu- ja paperiteollisuudessa käytävien sekoittimien yleiskatsaus.....	35
4. HELMIX-SEKOITTIMET JA NIIDEN KÄYTTÖ SELLUTEOLLISUUDESSA.	43
5. LCA-KUVAUS JA TAVOITTEET	45
5.1 Vaihtoehdot elinkaariarvioinnille (Life Cycle Assessment).....	47
5.2. Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely	49
5.3 Inventaarioanalyysi (LCI).....	50
5.4 Vaikutusarviointi (Life Cycle Impact Assessment, LCIA)	50
5.5 Tulosten tutkinta	51
6. HELMIX-VAAKASEKOITTIMEN LCA	52
6.1 Yleiset näkökohdat	52
6.2 Helmix-vaakasekoittimen LCA tavoitteet	52

6.3 Järjestelmän rajat	52
6.4 Helmix-vaakasekoittimen LCA inventaarioanalyysi (LCI).....	54
6.5 Vaikutusarviointi	69
6.6 Tulosten tulkinta ja herkkyysanalyysi	78
7. GWP-VAIKUTUKSEN PIENENTÄMISEN MAHDOLLISUUDET.	80
7.1 Sekoittimen optimointi sähköenergian kuluttamisen näkökulmasta.	81
7.2 Sähköenergia.....	87
7.3 Materiaalin käyttö	89
8. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	91
8.1 Lisätutkimuksia.....	93
KIRJALLISUUS.....	94

LIITTEET:

LIITE 1: HF-80 sekoittimen osaluettelo

LIITE 2: Ruostumattoman teräksen tuotanto, prosessi kuvaus

LIITE 3: Ruostumattomaan teräkseen EN 1.4404 mekaaniset ominaisuudet

LIITE 4: Korkea lujiset muovit, mekaaniset ominaisuudet

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Kreikkalaiset

α	Kaltevuus kulma	[°]
β	Potkurin kierre-kulma	[°]
η	Höytysuhde	[%]
π	Pii vakio; 3,14	[-]
ρ	Nesteen tiheys	[kg/m ³]
ω	Kulmanopeus	[rad/s]

Latinalaiset

c	Liukoisuus	[1/l _x]
d	Sekoittimen (potkurin, turbiinin) halkaisija	[mm]
D	Sekoitus säiliön sisähalkaisija	[mm]
g	Painovoiman kiihtyvyys	[m/s ²]
H	Potkurin askel	[mm/kierros]
k	Kerroin, jolla otetaan huomioon nesteen liukumista	[-]
L	Sekoitus säiliön korkeus	[mm]
n	Sekoittimen kierrosluku	[krt/s]
N	Tarvittava teho	[kW]
P	Paine	[MPa], [mmHg]
Q	Sekoittimen tuottavuus	[kg/s]
R	Ympyrän säde, jota kuvaa terän äärimmäinen piste	[m]
Re	Reynoldsin luku, vakio	
t	Aika	[s]
T	Lämpötila	[°C]
v	Vastavirran nopeus potkurin vyöhykkeessä	[m/s]

Lyhenteet

AISI	American Iron and Steel Institute
CC	Climate Change
CLM	Institute of Environmental Sciences
CNC	Computer numeric control

CO ₂	Carbon dioxide, hiilidioksidi
CTMP	Chemical Thermo Mechanical Pulp (selluloosan kemiallinen kuumahierrettä)
DALY	Disability Adjusted Life Years
DIN	Deutsches Institut für Normung (Saksalainen standardointi-instituutti)
ED	Damage to ecosystem diversity
EIOLCA	Economic Input-Output LCA
EPD	Environmental product declarations
EPS	Environmental Priority Strategies
EU	European Union
GaBi	Ganzheitlichen Bilanzierung (kokonaisvaltainen tasapainotus - saksa)
GHG	Greenhouse Gas (kasvihuonekaasu)
GWP	Global Warming Potential (ilmaston lämpenemisen potentiaali)
HH	Damage to human health
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Organization for Standardization
LAM	Laser additive manufacturing
LCA	Life Cycle Assessment (Elinkaariarviointi)
LCI	Life Cycle Inventory (Inventaarioanalyysi)
LCIA	Life cycle impact assessment (Vaikutusarviointi)
LIME	Life Cycle Impact Assessment Method based on Endpoint Modeling
NAGUS	DIN-Normenausschuss Grundlagen des Umweltschutzes
PAI	Polyamide-imides
PDF	Potential Disappeared Fraction
PEEK	Polyether ether ketone
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
YLD	Years of Life Disabled (vammaisuuuden elinvuodet)
YLL	Years of Life Lost (kadonneet työelämävuodet)

1. JOHDANTO

Tämän diplomityön tutkimuskohteena on sekoituslaitteen elinkaariarviointi eli LCA. Työn tavoitteena on tehdä erään sekoittimen elinkaariarviointi ja analysoida sekoittimen LCA-tulokset, vaikutus ilmastonlämpenemisen potentiaalin (GWP) suhteen, sekä tutkia sekoittimen LCA perusteella saadun GWP vaikutuksen pienentämisen mahdollisuudet, sekä etsiä mahdollisesti uudet rakenteelliset ratkaisut ympäristövaikutuksien pienentämiseen suhteen. Sekoittimen mahdolliset käyttöalueet ovat eri sellu- ja paperiteollisuus, raskaiden jäteneiteiden käsittely, sekä muut teollisuusalat, joissa käytetään tämäntyyppisiä laitteita.

Työn teoriaosassa käsitellään sekoitusprosessit, sekoituslaitteiden tyypit, niiden rakenteen erikoisuudet, käyttötarkoitus, toimintaperiaatteet, ja tehdään sellu- ja paperiteollisuudessa käytävien sekoittimien yleiskatsaus, lopuksi teoriaosan viimeisessä luvussa kuvataan yleisesti elinkaariarviointi menetelmä (LCA). Empiirisessä työosassa kuvataan tutkittavan sekoittimen LCA: vaikutus ilmaston lämpenemiseen (GWP) suhteen sekä GWP vaikutuksen pienentämisen mahdollisuudet.

LCA:lla voidaan arvioida tuotteiden ympäristövaikutuksia. Tämän menetelmän avulla arvioidaan ekologisia vaikutuksia tuotteen koko elinkaaren aikana: raaka-aineiden hankinnasta tuotantoprosessiin, käyttöön ja jätteenkäsittelyyn asti.

LCA menetelmän käyttäminen ei ole aina helppoa. Luotettavia tuloksia saa helpoimmin yksinkertaisista tuotteista (tavaroista tai aineista). Jos elinkaaren analyysi tehdään monimutkaisemmista tuotteesta (järjestelmistä), ja tuotteen käyttöaika on monen vuoden kestoinen. Tässä nyt ei ole kysymys LCA menetelmän puutteista vaan ongelman moninaisuudesta ja monimutkaisuudesta. Samalla LCA menetelmällä tehty arvioinnin tärkeys ja tarve on hyvin suuri - ei pelkästään ympäristövaikutuksien arvioinnin suhteen vaan se myös edistää arvokkaiden tilasto- ja tutkimustietojen kertymistä. Sen seurauksena yleisestikin LCA tuloksien tarkkuus ja luottamus kasvavat.

Tärkeä johtopäätös on tehty 4E (Tähkämö, 2014) kansainvälisen viraston julkistamista raporteista, missä oli vertailtu eri sähkölaitteiden elinkaariarviointeja. Näistä raporteista nähdään, että pitkäaikakäyttöiselle tuotteelle (järjestelmälle) on ominaista seuraava jako elinkaaren vaiheista kokonaisympäristövaikutukseen:

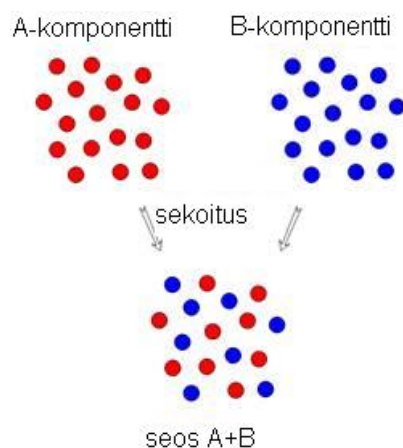
- 85 % - käyttöaika
- 15 % - tuotanto, käytöstä poisto ja kierrätyskaudet.

Tästä seuraa johtopäätös, että tutkijoiden huomio on kiinnitettävä nimenomaan käyttöaikaan. Tämän jälkeen voidaan myös tehdä johtopäätökset tarvittavista jatkotoimenpiteistä ja pienentää laitteen ympäristövaikutuksia.

2. SEKOITUSPROSESSIEN ERILAISET TOTEUTUSTAVAT NESTEMÄISIÄ JA KOLLOIDI AINEITA VARTEN

2.1 Yleistä sekoitusprosessista

Sekoitus on prosessi, jossa ulkopuolisen vaikutuksen tuloksena kahdesta tai useammasta aineesta muodostuu seos, jonka komponentit ovat jakautuneet mahdollisimman tasaisesti. Sekoitusprosessin alkuvaiheessa komponentit ovat toisistaan erillään ja vain vähän sekoitettuja. Pitempiaikaisen sekoituksen jälkeen tapahtuu voimakas aineen keskinäisjakaantuma, mikä johtaa yhteiseen tasaiseen jakaantumiseen (Kuva 1). (Intech GmbH, 2015)



Kuva 1. Aineiden sekoitusprosessi. (Intech GmbH, 2015)

Aineiden sekoituksessa voi saada homogeenisiä ja heterogeenisiä seoksia. Homogeenisille seoksille on ominaista se, että niissä tapahtuu komponenttien hajaantuminen mikrohiukkasiin (atomeihin tai molekyyliin) ja niiden tasainen jakaantuminen toisiinsa. Homogeenisiin seoksiin kuuluvat esimerkiksi: suolaliuokset, metalliseokset, kaasumaisten

aineiden seokset. Heterogeenisissä seoksissa aineen komponentteina esiintyvät tipat tai raejauheet. Siinä muodossa ne jakaantuvat toisiinsa. Näihin seoksiin kuuluvat esimerkiksi: jauhot, suspensiot, emulsiot, aerosolit. Seoksia käytetään runsaasti teollisuudessa välituotteen ja lopputuotteen saamiseen, sekoittamalla kahta tai useampaa komponenttia. Esimerkiksi rasva-, maali- tai lannoiteseoksia, valmistellaan lähtöaineseoksia kemiallisien reaktioiden varten.

Suspensioiden, emulsioiden sekä kiinteiden aineiden seoksen valmistukseen käytetään sekoitusprosessia. Tätä prosessia käytetään myös kemiallisessa tuotannossa lämmön ja massan siirtoprosessien tehostamiseen. Sitä paitsi tehokasta sekoitusta tarvitaan monenlaisissa jatkuvissa kemiallisissa prosesseissa. On olemassa muutamia sekoitusprosessimuotoja ja niihin käytetään eri laitteita riippuen sekoitettavien aineiden koostumista. Kemiallinen muutos (reaktio) ja sekoitus ovat prosesseja, jotka voivat tapahtua joko erikseen tai yhdessä, samanaikaisesti ja samassa paikassa. Erillistä sekoitusprosessia varten käytetään sekoittimia, samanaikaisia (sekoitus- ja kemiallinen reaktio) varten käytetään sekoittimilla varustettuja reaktiolaitteita. (Intech GmbH, 2015)

Sekoitusprosessit riippuen sekoitusympäristöstä jakautuvat joko nestemäiseen, kiinteään, rakeiseen tai taikinamaiseen sekoitettavan aineen mukaan. Sekoitusprosessit myös jakaantuvat sekoitettavan ja lopullisen aineen agregaatitilan mukaan: tasa-aineiseen liuokseen, seka-aineiseen emulsio-seokseen, suspensioitumiseen, kiinteään ja kuivaan hienojakoiseen seokseen.

Sekoitettavien aineiden koostumus ja fysikaaliset ominaisuudet, sekä lopullisten seosten vaatimukset määrittävät sekoituksen menetelmiä ja tämän johdosta myös sekoituslaitteen rakennetyyppejä. Joka tapauksessa sekoituslaitteen tehtävänä on tasa-aineisen seoksen valmistus minimaalisella energiankäytöllä ja maksimaalisella hyötysuhteella. Teollisuudessa tavallisimpia nestemäisten aineiden sekoitusmenetelmiä ovat:

- barbatointi eli kaasun puhallus nesteeseen,
- sekoitus mekaanisten sekoittimien avulla (heilahdusliike / kierto liike);
- staattisten turbulenssilaitteiden (levyjen) asentamisella sekoitusvirrassa;
- sekoitus keskipakopumpun / suihkupumpun avulla.

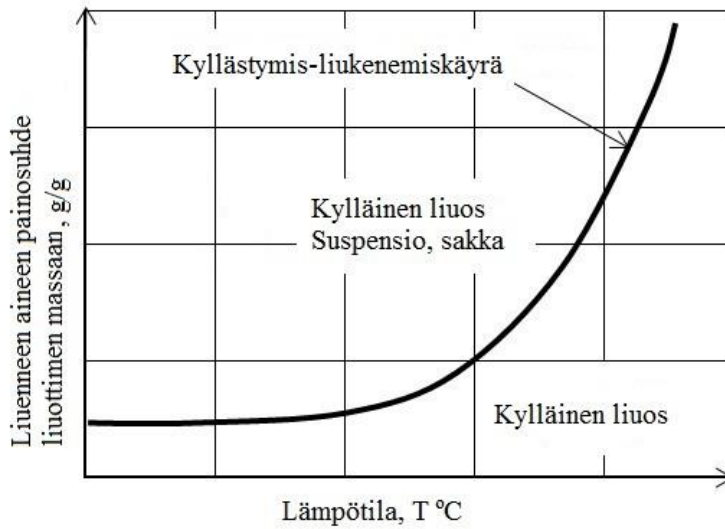
Sekoitusprosessissa ainekoostumus määrittää sekoitustavan:

- sekoitus sekoittimilla, jolloin mekaanisten liikkuvien pyörivien elementtien avulla sekoitetaan nestemäisiä aineita (kahta tai useampaa), tai niissä liuotetaan kaasumaisia, kiinteitä tai nestemäisiä komponentteja;
- sekoitus virranerittelymenetelmällä, jolloin kaasut ja/tai nesteet sekoitetaan suuttimien ja pumppujen avulla, sekä sekoittimissa, joihin on asennettu liikkumattomat virranjakajat;
- vaivaaminen (taikina), sama kuin sekoitus, jolloin sekoitettavina materiaaleina ovat juoksevat aineet tai tahnamaiset (pastat);
- kuiva sekoitus, jolloin jauhemaisia aineita sekoitetaan kuivaan aineeseen;
- ruiskutus, sumutus ovat menetelmiä, joissa nesteet, tipat tai ohuen faasin jauheet puhalletaan ilmaan, jolloin muodostuu sumua tai pölyä;
- kaasuttaminen, pseudonesteytys ovat menetelmiä, joissa nesteissä tai kiinteässä jauheessa muodostuu hyvin pieniä kaasurakkuloita. Kaasun ja aineen välillä on oltava äärimmäisen voimakas kontakti.
- mekaaninen sekoitus, jolloin sekoittimen avulla nesteet sekoittuvat toisiinsa, tai kiinteä aine jakaantuu tai sulautuu nesteeseen muodostaen siten suspension, liuoksen tai emulsion. (Intech GmbH, 2015)

2.2 Liukeneminen

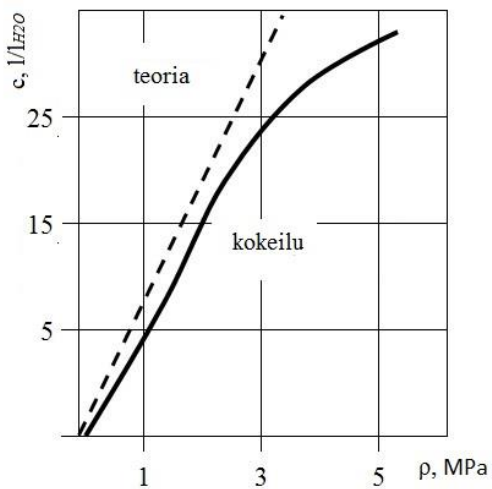
Liuentamisprosessi tarkoittaa kiinteän aineen jakaantumista nesteeseen. Kiinteä aine hajaantuu siten atomeiksi, ioneiksi tai molekyyleiksi. Aluksi lisättävä kiinteä aine liukenee nesteessä täysin. Lisäämällä seuraavan määrän ainetta liukeneminen tapahtuukin hitaammin, ja sen jälkeen kiinteä aine ei enää liukene. Kun aineen määrä nesteessä on maksimillaan, liuos tulee kylläiseksi. Seuraavissa aineen lisäyksissä ei tapahdu liukenemistä, aine säilyy nesteessä suspensoituneena tai sakkautuu. Korkeammissa lämpötiloissa liukenee suurempi määrä ainetta kuin alhaisissa lämpötiloissa. Kyllästymisen konsentraation riippuvuus lämpötilasta näkyy kuvassa 2. (Intech GmbH, 2015)

Jokainen käyrän piste kuvaa liukenemisen ja kiteytymisen tasapainotilaa. Liukenemistä voidaan nopeuttaa sekoittamalla. (Karapetjanc, 1981, p. 632).



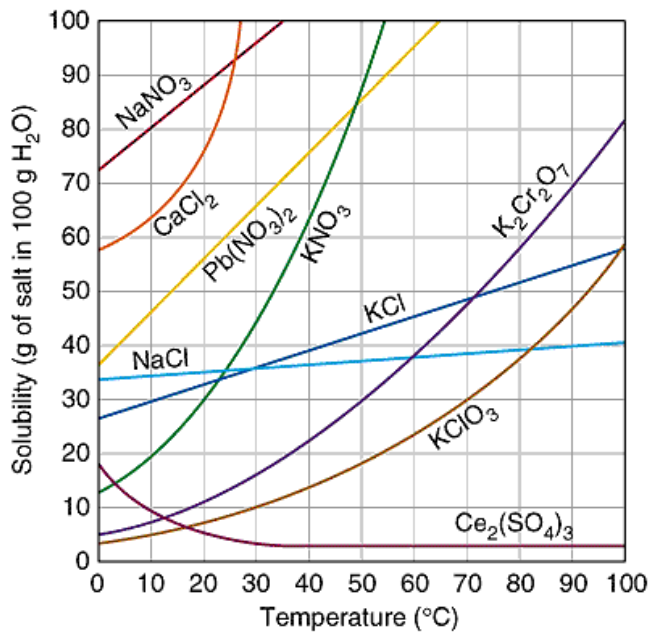
Kuva 2. Kyllästymis-liukenemiskäyrä (Intech GmbH, 2015)

Liukenemiseen vaikuttaa myös paine. Kaasujen liukoisuus nesteissä kasvaa suoraan verrannollisesti paineen kasvaessa (Kuva 3).



Kuva 3. Riippuvuus CO₂ – kaasun liukoisuuden paineesta. (Karapetjantc, 1981, p. 633)

Kuvassa 4 näkyy eri suolojen liukoisuus liuottimen(vesi) lämpötilan funktiona.



Kuva 4. Eri suolojen liukoisuus lämpötilan suhteen (ScienceGeek.net, 2011)

2.3 Dispergointi, emulgointi

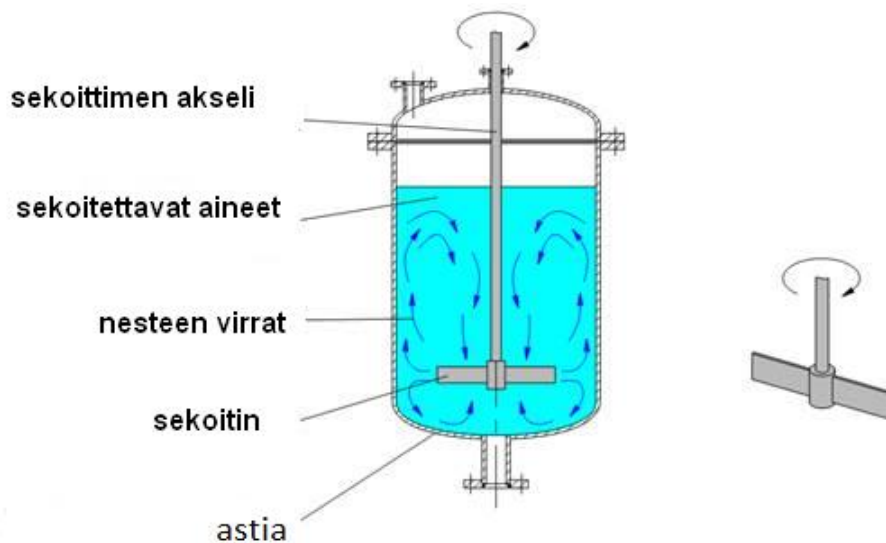
Dispergointi tarkoittaa kiinteiden, nestemäisten tai kaasumaisten aineiden ohutta jauhamista ja sekoittamista nesteeseen. Aine esiintyy nestemäisessä mikrohiukkasten muodossa. Saatu liuos nimitetään dispersioksi. Dispersion saamiseksi voidaan käyttää dispergointiaineita, millä vähennetään nesteen pintajännitystä. Riippuen aineen fyysisestä olomuodosta erotetaan:

- emulsio, dispergoiva aine on neste, nestepisarot eivät liukene nesteessä, mutta ovat hienojakautuneita toisessa nesteessä;
- suspensio, dispergoiva aine on liukenematon nesteessä oleva kiinteä aine. (Kemistin käsikirja, 1986, p. 123)

2.4 Mekaaninen sekoitus

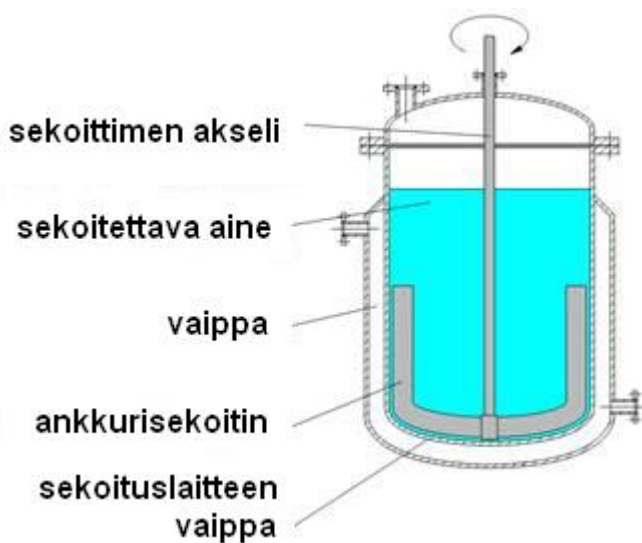
Mekaanisen sekoituksen aikana sekoitettavaan aineeseen vaikutetaan käyttämällä erirakenteisia sekoittimia. Sekoittimet asetetaan astiaan, ja sekoitus tapahtuu yleensä pyörivällä liikkeellä pituusakselin ympäri. Mekaaninen sekoitus suoritetaan tavallisesti

sekoittimilla, jotka koostuvat yhdestä tai useammasta parista lapoja. Lavat ovat kiinnitetty akseliin, joka pyörii moottorivaihteiston välityksellä. Agitaattorin työ-osien liikkuminen luo monimutkaisen spatiaalisen sekoitettavan aineen hiukkasten liikkeen, mikä johtaa keskinäiseen tunkeutumiseen ja tasaiseen partikkelien jakautumiseen. Periaatekuva laitteen rakenteesta aineiden mekaanista sekoittamista varten on esitetty kuvassa 5. (Intech GmbH, 2015)



Kuva 5. Sekoitin, periaate kuva. (Intech GmbH, 2015).

Korkeissa paineissa ja lämpötiloissa käytetään autoklaaveja tai sekoittimella varustetut varustettuja paineastioita. (kuva. 6). (Intech GmbH, 2015).



Kuva 6. Sekoittimella varustettu paineastia. (Intech GmbH, 2015).

Sekoittimella varustetun paineastian:

- 1) seinät, pohjaseinät, laipat ja kaulat on valmistettu paksummasta materiaalista;
- 2) vaipassa jäähdytys- tai lämmitysneeste.

2.5 Nesteiden ja suspensioiden barbatointisekoitus.

Sekoitusmenetelmä, jossa sekoitus tapahtuu ilman, höyryn tai liukenevan kaasun puhalluksella, on pneumaattinen sekoitus. Tätä menetelmää käytetään kun sekoituksen rinnalla halutaan tehdä kaasuttamista tai kuumalla höyryllä kuumennusta. Pneumaattiseen sekoitukseen sopivat nesteet, joilla on alhainen viskositeetti. Jos käyttää nesteitä, joilla on korkeampi viskositeetti, niin luonnollista kiertoa ei tapahdu. Pneumaattiseen sekoitukseen käytetyissä säiliöissä on rei'itetyt levyt, suuttimet, injektorit tai putket, joita pitkin kaasua syötetään (kuva 7). (Gelperin, 1981, pp.177 - 192).

Yksi nesteen sekoitusmenetelmistä on dispergoitun kaasufaasin puhallus nesteeseen. Tämän prosessin nimi on barbatointi, ja siihen käytettävän laitteen nimi on barbatointilaitte. Tämä menetelmä on yksinkertainen ja sitä käytetään, jos yksi sekoitettavista aineista on kaasu tai ilma. Se sopii myös silloin, kun sekoituksen rinnalla käytetään suoraan höyryllä lämpötilan nostamista.

Barbatointisekoitusta käytetään:

- jos kaasun tai sen erillisten komponentit osallistuvat kemialliseen reaktioon sekoitettavan nesteen kanssa;
- nesteiden ja kaasujen massanvaihtoprosesseissa;
- nesteiden ja höyryjen massanvaihtoprosesseissa

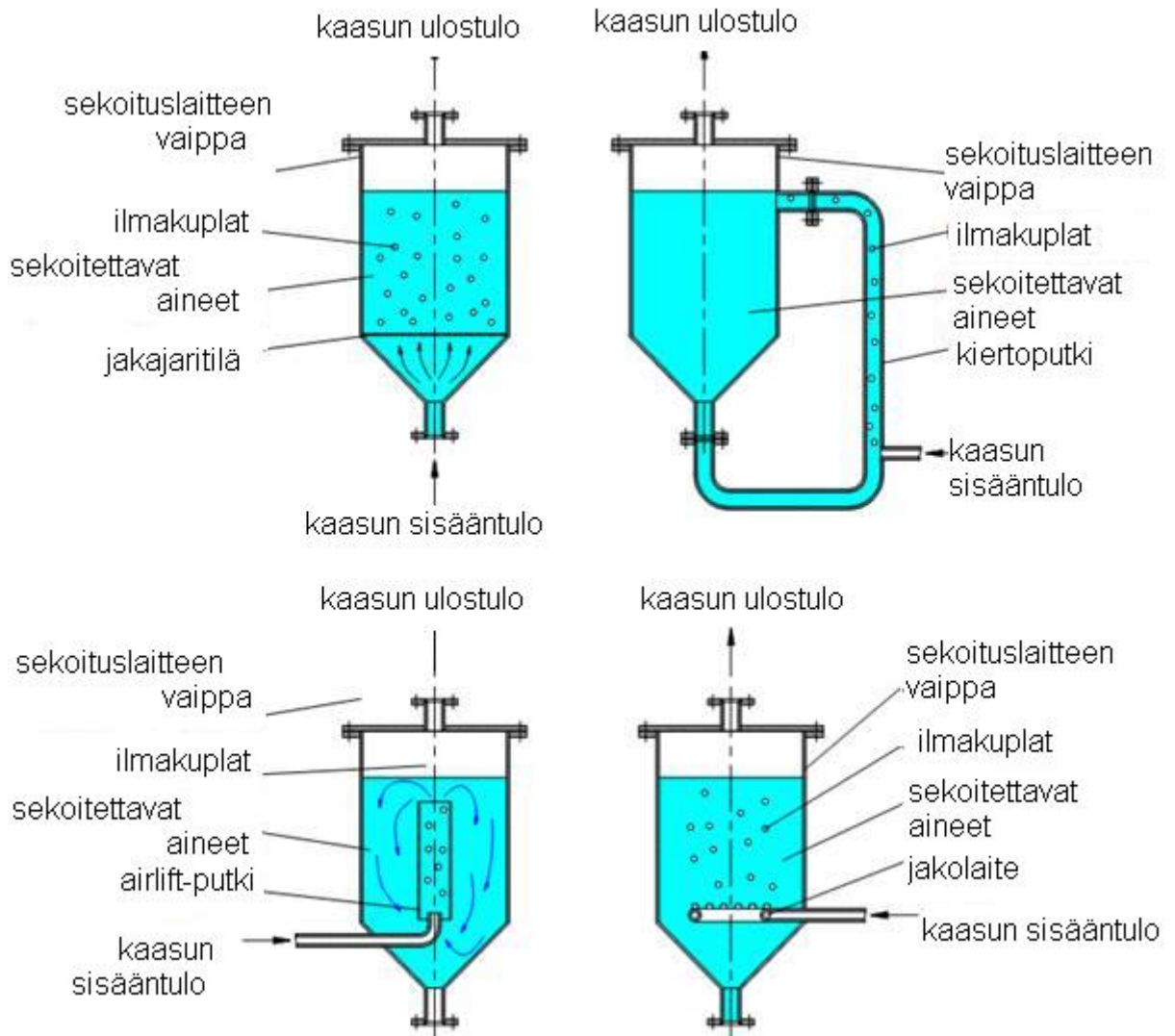
Barbatointisekoituksen etuja ovat:

- ei ole liikkuvia osia;
- laitteen yksinkertaisuus;
- on helppo ylläpitää kiinteä faasi suspendoituneena

Kuitenkin on huomattava että barbatoinnin aikana voi kulkeutua pois arvokkaita aineita höyryämisen aikana tai kulkeutua kaasun mukana, mikä taas voi aiheuttaa epätoivottuja prosesseja kuten sekoitettavan nesteen hapettuminen tai hartsautuminen (resinification). On

myös tärkeää huomata, että barbatointi kuluttaa enemmän energiaa kuin mekaaninen sekoitus. (Gelperin, 1981, pp.177 - 192).

Kaaviot barbatointilaitteiden kaasukomponenttien eri syöttömekanismeista on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Nesteiden ja suspensioiden barbatointisekoitus, periaatekuvat. (Gelperin, 1981, pp.177 - 192).

Barbatointilaitte on säiliö, jonka pohjassa on moni-aukkoinen putki ja jonka kautta puhalletaan kaasua (kuva 7). Nouseva ilmavirta vie mukanaan nesteen partikkelit, minkä ansiosta syntyy virta. Virran nopeus kasvaa kaasun liikenopeuden kasvaessa. Jotta rei'itettyjen putkien aukoista ulostuleva ilma läpäisisi samanvertaista virtausvastuuta, mikä on tärkeää sen tasaisen jakaantumisen takia, putket asennetaan vaakasuorassa. Aukkojen on oltava putkessa spiraalilinjaa pitkin turvatakseen tehokkaasti nesteen sekoituksen. Aukkojen

halkaisijan on oltava mahdollisimman pieni, mikä myös auttaa tasaista kaasufaasin jakaantumista. Välttääkseen tukkeutumista valitaan tavallisesti 3 - 6 mm halkaisija. (Gelperin, 1981, pp.177 - 192).

Energiankulutus barbatointisekoituksessa

Vapaan barbatoinnin olosuhteissa kaasuvirta kulkee rei'itettyjen ritilöiden kautta ja tullessaan aukoista ulos jakaantuu kupliksi. Kuplat työntävät nestettä eteenpäin ja sivuille ottaen samalla mukaan nesteen lähimmäiset kerrokset paineenlaskun ja jännitteen ansiosta, mikä syntyy kuplan reunan ulkopuolella. Ulkopuolinen hydrostaattinen nestepaine laskee ja kupla nousee. Kupla kasvaa, menettää pallomuotonsa ja sen liikkeen kulkuradaksi tulee pystysuora.

Kaikki edellä mainitut prosessit ja kuplien fuusio aiheuttavat sekoitustehokkuuden kasvua suunnassa alhaalta ylhäälle. Kun kaasukuplat nousevat ylös ja pääsevät vapaan laitteen tilaan, neste laskeutuu alas. Näin sekoitus ja nesteen kiertokulku on energiansiirtoprosessi (liikemäärän) kaasulta nesteelle. Barbatointisekoittimista parempina tyyppinä pidetään laitteita, joissa nesteen kerroksen korkeus on suuri. (Gelperin, 1981, pp.177 - 192)

Barbatointilaitteessa suuri rooli on putken halkaisijan valinnalla. Mitä suurempi on putken halkaisija, sitä alempi on virran turbulenssi, mutta tehokkaampi kiertokulku. Näiden tekijöiden optimaalinen suhde turvaa suuren tehokkuuden sekoituksessa. (Gelperin, 1981, pp.177 - 192)

Erikoistapaus pneumaattisesta sekoituksesta on paineilmasekoitus, joka sopii vain alhaisen viskositeetin nesteille, mutta tämä menetelmä aiheuttaa huomattavasti menoja kuluttaen energiaa ja aikaa. Lisäksi prosessin aikana voi tapahtua sekoittavien aineiden haihtumista tai hapettumista.

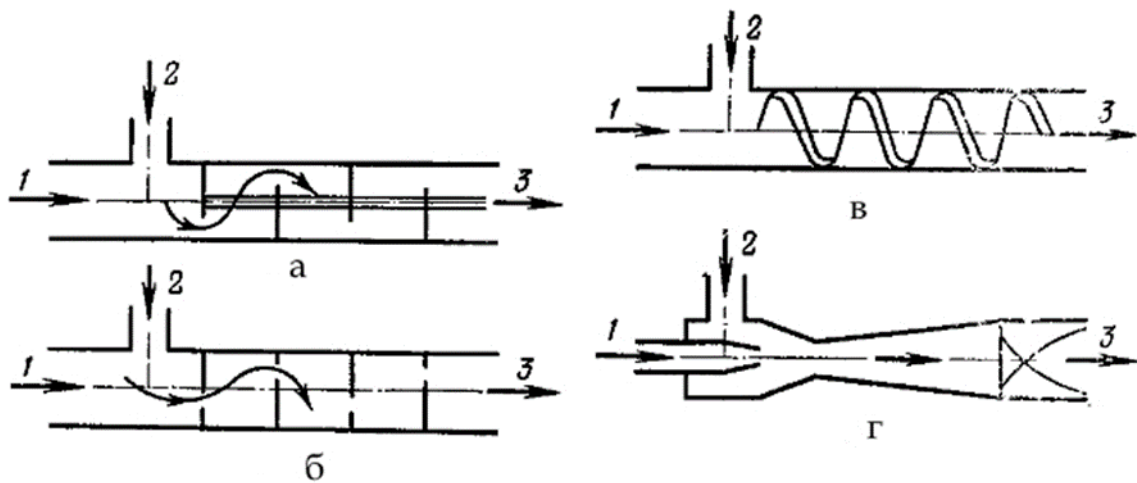
Sekoitus paineilmalla järjestetään laitteissa, joihin kuuluu barbatointilaitte (putki aukkoineen, joiden kautta tulee ilmaa) tai laitteissa, jotka toimivat airlift-menetelmällä (ilman-nosturi). Airliftissä tapahtuu yhtäaikaista nesteiden siirtoa ja sekoitusta. (Gelperin, 1981, pp.177 - 192)

2.6 Aineen sekoitus liikkumattomilla virta-turbulenssilaitteilla

Nesteiden ja kaasujen sekoitukseen putkilinjoissa käytetään keinotekoisia virran turbulenssia. Tähän tarkoitukseen putken sisään asennetaan staattiset komponentit, jotka säätelevät virran suunnan ja nopeuden:

- puolivälilevyt ja diafragmat sierettyjen aukkojen kanssa;
- kierteiset insertiot;
- injektiosekoittimet.

Puolivälilevyjä ja diafragmaja käytetään virran säätämiseen, esimerkiksi kapenemiseen ja laajentamiseen, ja virran suunta yleensä muuttuu. Kierteiset insertiot vaihtelevan kierresuunnan kanssa (vasen ja oikea) laittavat virran kiertämään eri suuntiin. Injektiosekoittimia käytetään yleensä kierteisten insertioiden kanssa yhdessä. (Gelperin, 1981, pp.183) Periaatekuvia yllämainituista laitteista on esitetty kuvassa 8.

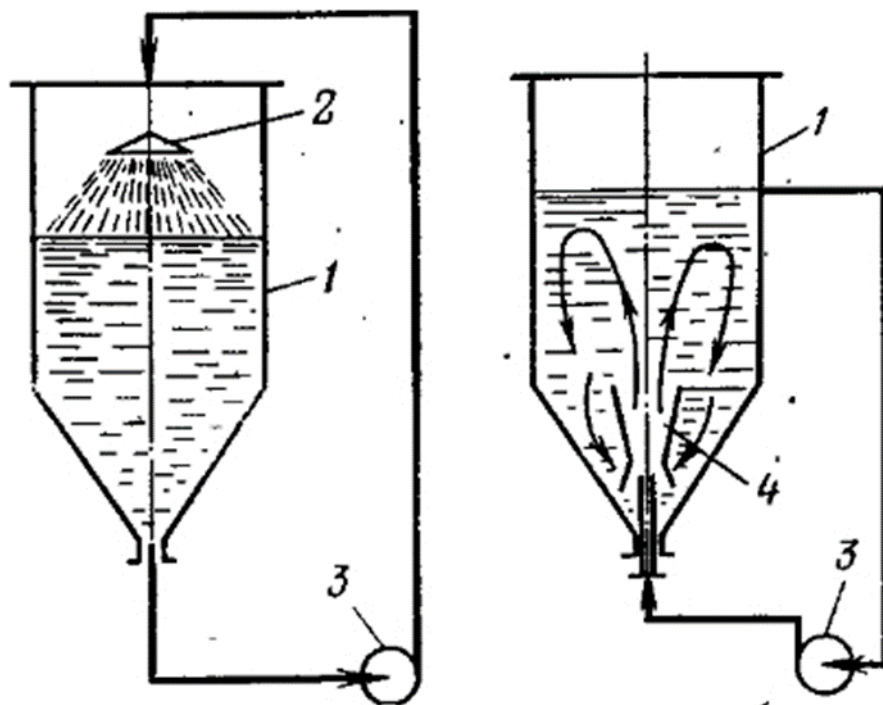


Kuva 8. Laitteet liikkumattomien turbulenssilaitteiden kanssa. a – puolivälilevyt; б – diafragmat; в – kierteinen insertio; г – injektiosekoitin, 1,2 – sekoitettavien aineiden sisään tulo; 3 – sekoituksen ulostulo. (Gelperin, 1981, pp.183)

2.7 Nesteiden kiertosekoitus

Nesteen kiertokulku umpikierrrossa voi aiheuttaa tehokkaan sekoituksen. Tämä prosessi tapahtuu keskipakopumpun tai suihkupumpun avulla toimien turbulenssilaitteena.

Sekoitus nesteiden kiertokulun avulla tapahtuu kahdella tavalla. Suurissa laitteissa, missä sekoitetaan nesteitä, joiden komponenteilla on eri tiheys, alakerrokset imeytyvät keskipakopumpulla. Painavampi kerros kulkee pumpun läpi ja syöttöputken kautta se syötetään kiertoputkeen tullen suihkuttimen kautta nesteen pintatasoon (kuva 9a). Pumpputehon kasvaessa kasvaa myös nesteen kiertokulku sekoittimessa. Toisessa tapauksessa sekoitettavat aineet otetaan nestepatsaan yläosasta ja syötetään puhallussuutinjakokanavien läpi sekoittimen alaosaan (kuva 9b). (Gelperin, 1981, p.184)



Kuva 9. Nesteiden kiertosekoituslaite. 1 – sekoitin; 2 – suihkuttimen; 3 – keskipakopumppu; 4 – puhallussuutinjakokanava. (Gelperin, 1981, p.184)

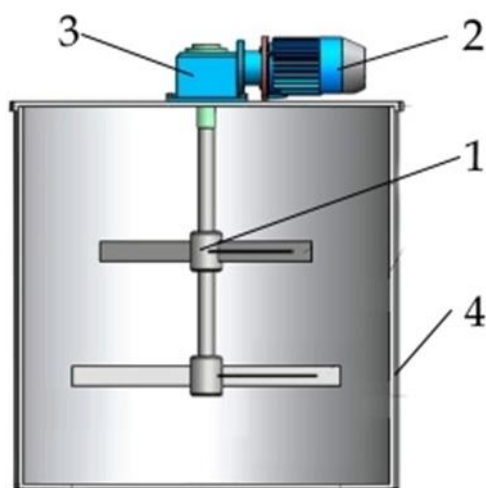
2.8 Mekaaniset sekoittimet.

Sellumassan erityiset ominaisuudet rajoittavat merkittävästi mahdollisuutta käyttää erilaisia sekoituslaitteita. Näiden ominaisuuksien takia massa- ja paperiteollisuudessa sovelletaan ainoastaan mekaanisia sekoittimia. Ominaisuuksista johtuen mekaaniset sekoittimet voidaan jakaa seuraaviin päätyyppeihin:

- lapasekoittimet;

- potkurisekoittimet;
- turbiinisekoittimet;
- erikoissekoittimet. (Gelperin, 1981, p. 178 - 181)

Jokaisessa tyyppiryhmässä on toteutusvaihtoehtoja, mitkä riippuvat sekoitettavien aineiden ominaisuuksista. Toinen luokitusperuste on sekoittimen liikkuvan osan nopeus. Tässä yhteydessä erotetaan hidaskäyntisiä ja nopeita sekoittimia. Tärkeimmät mekaanisen sekoittimen laitteistoyksiköt ovat: roottori (oikeastaan sekoitin) (1 – kuva 10), sähkömoottori (2 – kuva 10), vaihteisto (3 – kuva 10) ja sekoitinrunko (4 – kuva 10).



Kuva 10. Mekaanisen sekoittimen periaatekuva. (Tulmesh, 2015).

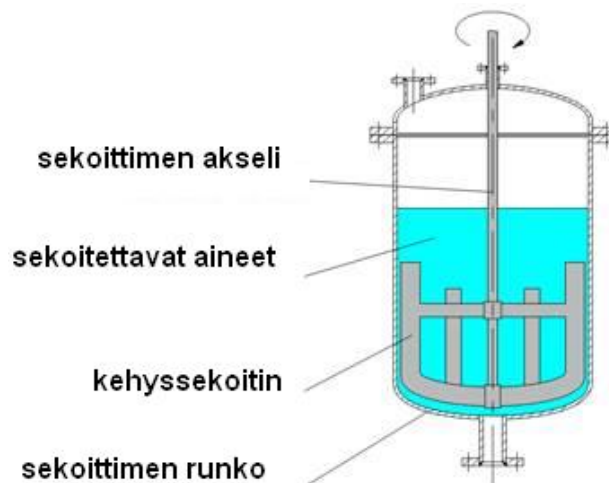
Mekaanisissa sekoittimissa käytetään erikokoisia AC moottoreja. Ne ovat erittäin taloudellisia ja lisälaitteiden yhteydessä mahdollistavat pyörimisnopeuden säädön, mikä puolestaan mahdollistaa koko prosessin optimoinnin. Vaihteistoa käytetään roottorin pyörimisnopeuden säätämistä varten. Tätä tarkoitusta varten käytetään sarja- tai erillistuotannossa valmistettuja hammas- tai hihnavahteistoja. Asennuksen helppous, huolto ja korjausta varten laitteeseen on suunniteltu liittimet ja tukikomponentit. Näiden komponenttien ominaisuudet ja niiden valinta sekä laskentamenetelmiä on esitelty lähteissä /Tshevits, Atlas - vaihteistojen mallit, 1990, p. 151 ja Anurjev, Konesuunnittelijan käsikirja, 1980, p.728/.

2.8.1 Hidaskäyntiset mekaaniset sekoittimet

Hidaskäyntisiä mekaanisia sekoittimia ovat:

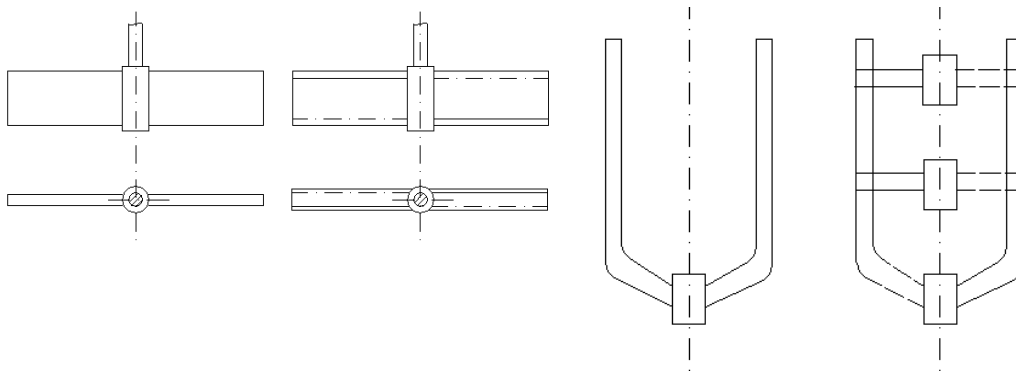
- lapasekoittimet;
- levysekoittimet;
- ankkurisekoittimet;
- planetaariset sekoittimet. (Gelperin, 1981, pp. 178 – 181)

Lapasekoitin on yksinkertainen sekoitin, joka koostuu akselista, mihin on kiinnitetty sarja litteitä teräslaattoja. Lavat asennetaan akseliin kohtisuoraan tai kallistuksella. Sekoitusprosessin parantamiseksi käytetään kehys- tai karmisekoittimia, jotka on varustettu sekä vaaka- että pystysuoralavoilla (kuva 11, 12). (Gelperin, 1981, pp. 178 - 181) Lapasekoittimen muotoilukonsepti on aika yksinkertainen, joten niiden valmistuksella on suhteellisesti alhaiset kustannukset.



Kuva 11. Lapa-kehyssekoittimen periaatekuva. (Gelperin, 1981, pp. 177 - 181).

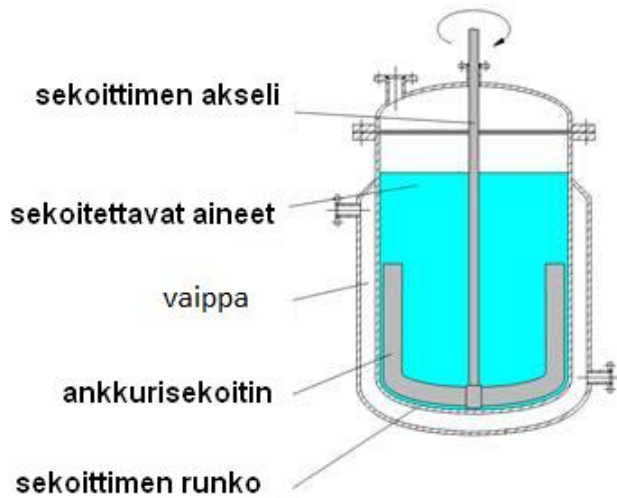
Tarvittaessa voidaan antaa osittainen pystysuora suunta virtaukselle, kun lavat kiinnitetään viistosuuntaan (kaltevuuskulma on tavallisesti $\alpha = 45^\circ$ C). Lapasekoittimen halkaisija on yleensä $(0,5 \dots 0,7) \cdot D$, jossa D on sekoitussäiliön sisähalkaisija. Pyörimisnopeus valitaan $1 - 3$ m/s riippuen sekoitettavan aineen viskositeetista. Korkeassa säiliössä ($L \gg D$, jossa L on säiliön korkeus), asetetaan 2–3 lapakerrosta, tai tarvittaessa enemmän. (Nesteiden sekoituslaitteet, 2009, Luku 1.6.)



Kuva 12. Yksinkertainen lapasekoitin. (Nesteiden sekoituslaitteet, 2009, luku 1.6.)

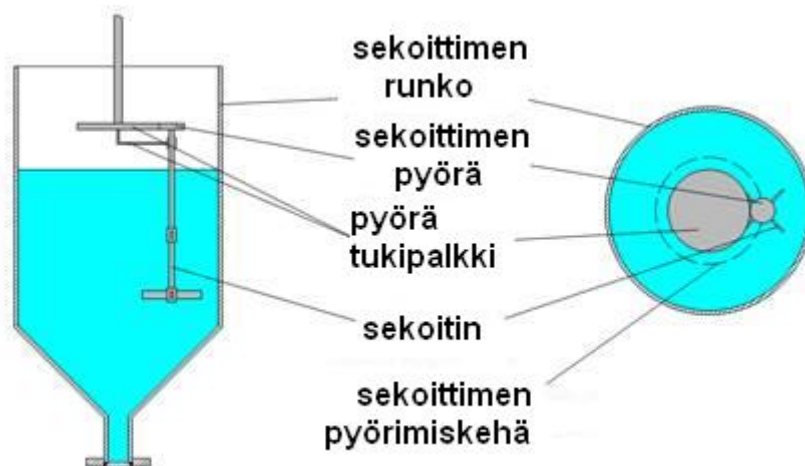
Levysekoittimet ovat lapasekoittimia, joille ominaista on lavan suuri korkeus. Näitä sekoittimia käytetään ohjauslevyillä (reflective edges) varustetuissa säiliöissä, koska ne antavat pyörimisliikkeen suurelle nestemäärälle. Sekoitusprosessin tehokkuutta voidaan lisätä tekemällä aukkoja lapoihin. Levysekoittimia käytetään sekoittamaan nesteitä, joilla on alhainen viskositeetti ($\leq 50 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) eivätkä ne sovi suspensioiden sekoittamiseen. (Gelperin, 1981, pp. 177 - 181)

Ankkurisekoittimissa sekoitettavat aineet sekoittuvat tavallisesti tangentialipyörimisliikkeen avulla (kuva 13). Tämän tyyppin laitteita käytetään sellaisten aineiden sekoittamiseen, joiden viskositeetti on suuri, $\geq 100 \text{ Pa}\cdot\text{s}$. Ankkurisekoittimissa ohjauslevyt säiliössä on asennettu sekoittimen lapojen yläpuolelle. Ankkurisekoittimen lapojen kehänopeus vastaa levysekoittimien nopeutta, ja se on alle $1 - 1,5 \text{ m/s}$. Ankkurisekoittimia käytetään silloin kun säiliön pohjalta tai seiniltä on poistettava jäännös, jotta parannetaan lämmönvaihtoa sekoitettavan aineen ja seinän välillä. (Gelperin, 1981, pp. 177 - 181) Ankkurisekoittimen muoto yleensä toistaa säiliön muotoa, ja ankkurin halkaisija yleensä on $(0,7 \dots 0,9) \cdot D$, mutta käytännössä se voi olla suurempikin. (Nesteiden sekoituslaitteet, 2009, Luku 1.6.)



Kuva 13. Ankkurisekoittimen periaatekuva. (Gelperin, 1981, pp. 177 - 181)

Planetaarisia sekoittimia käytetään sekoittamaan tehokkaasti nestettä säiliössä, jolla on suuri halkaisija (kuva 16). Tämän tyyppin sekoitin pyörii akselinsa ympäri, sekä liikkuu ympyrää kehällä, jonka keskipiste on samassa kohdassa kuin laitteen akseli. Lapasekoittimen liike on monimutkainen ja se saa aikaan tehokkaan nesteen sekoittamiseen. Akselien määrä tässä sekoittimessa määrittää sen tyyppin. Planetaarinen sekoitin voi olla yksi-, kaksi- tai kolmiakselinen. (Gelperin, 1981, pp. 177 - 181)



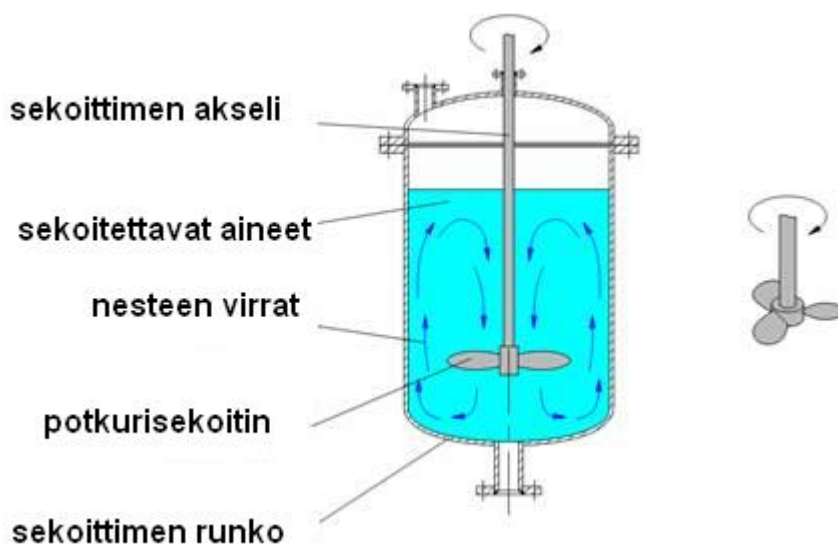
Kuva 14. Planetaarisen sekoittimen periaatekuva, (Gelperin, 1981, pp. 177 - 181).

2.8.2 Nopeakäyntiset sekoittimet

Nopeakäyntiset mekaaniset sekoittimet ovat:

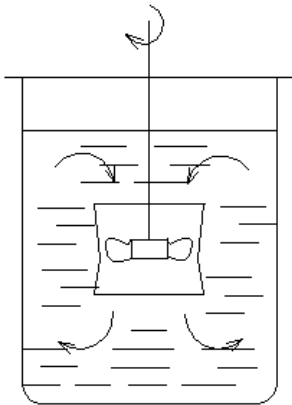
- potkurisekoittimet
- turbiinisekoittimet
- rengaspotkurisekoittimet

Potkurisekoittimia käytetään aktiivisesti sekoittamaan aineita, joiden viskositeetti on ≤ 10 Pa·s, useampi alle 2 Pa·s. Näiden laitteiden kehänopeus saavuttaa 10 - 15 m/s. Lavat ovat toiminnan peruselementtejä, niiden luku yleensä on 2 – 6 kpl. Lajojen kallistus voi muuttua. Ulkoasultaan sekoitin näyttää aluksen tai lentokoneen potkurilta. Sekoitin kiinnitetään akseliin, joka on liitetty sähkömoottoriin. Pyörimisessä sekoitin tekee sekoitettavan ympäristön radiaali- ja akselisuuntaista liikettä, minkä tuloksena muodostuvat sekoitettavan massan kiertävä virtaus. Yhden sekoittimen säiliössä potkurin halkaisija yleensä on $(0,25 \dots 0,33) \cdot D$. Potkurisekoittimen periaatekuva on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. Potkurisekoittimen periaatekuva (Gelperin, 1981, pp. 177 - 181)

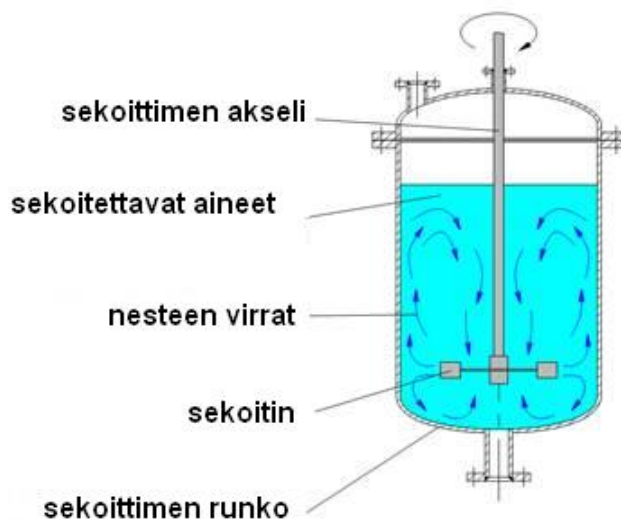
Potkurisekoittimet ovat rakenteeltaan yksinkertaisia, nopeakäyntisiä, eikä niiden valmistus ole kallista ja toimiessaan ne käyttävät pientä tehoa. Kemiallisessa teollisuudessa näitä sekoittimia käytetään sekoittamaan nesteitä, joilla on alhainen viskositeetti, emulsioiden valmistamiseen, sekä enintään 10 % kiinteää faasia sisältävien liuosten sedimentin resuspensoitumiseen. Laitteessa käytetään korkean säiliön kanssa diffuusoria (kuva 16), mikä on matalan lieriömäisen tai kartiomaisen holkin muotoinen. (Gelperin, 1981, pp. 177 – 181; Nesteiden sekoituslaitteet, 2009, Luku 1.6.)



Kuva 16. Potkurisekoitin diffuusorissa. (Nesteiden sekoituslaitteet, 2009, Luku 1.6.)

Turbiinisekoittimet

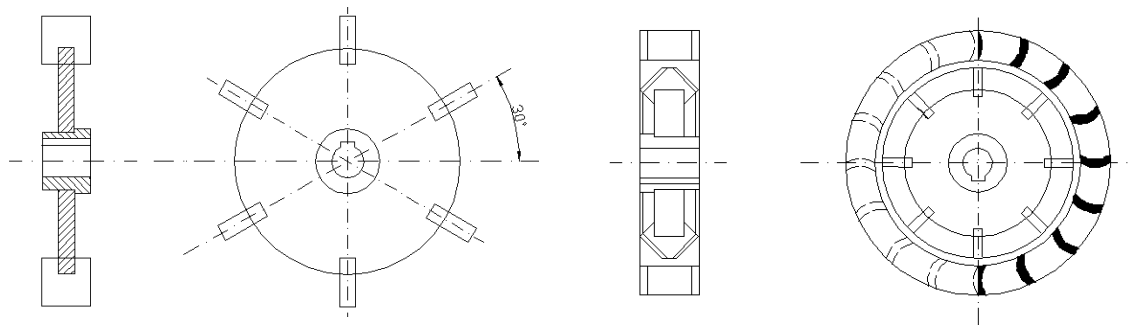
Turbiinisekoittimet (Kuvat 17, 18) ovat myös nopeakäyntisiä ja koostuvat pystysuorista suorakulmasiivistä, jotka on asennettu radiaalisesti vaakasuoralevyyn tai holkkiin. Kun siipipyörä pyörii, keskellä syntyy alipaine ja kehäosassa ylipaine. Säiliön seinämille siirtynyt neste jakautuu kahteen virtaan: ylä- ja alakerrokseen, ja turbiinin pyörän keskiosa imee ne sisäänsä. Näin syntyy kaksi sekoitettavaa kiertovirtaa. Mitä korkeampi on nesteen viskositeetti, sitä matalampi on sekoitusprosessin tehokkuus. (Gelperin, 1981, pp. 177 - 181)



Kuva 17. Turbiinisekoittimen rakenne (Gelperin, 1981, pp. 177 - 181)

Turbiinisekoitin koostuu tavallisesti muutamasta pienestä turbiinista (keskipakopyöristä), jotka kiinnitetään pystysuora-akseliin. Jokaisessa turbiinissa voi olla 3 - 16 lapaa tai enemmän. Suljetun tyyppin turbiini imee pyöriessään keskiaukon kautta nestettä, joka keskipakovoiman avulla kuljetetaan sisäkanavia pitkin. Turbiinisekoittimissa nesteen liikesuunta muuttuu pystysuorasta radiaaliseen. Virran kineettinen energia laskee, vaikka ei kovin merkittävästi. Nesteen virrat suurella nopeudella poistuvat pyörästä, leviten lukuisiin suuntauksiin, ja aiheuttavat koko nestemäärän tehokkaan sekoituksen. Kustannuksiltaan turbiinisekoittimet ovat potkurisekoittimia kalliimpia. Turbiinisekoittimia käytetään potkurisekoittimien sijasta, jos sekoitettavilla aineilla on korkea viskositeetti tai kun sekoitussäiliön muoto on erikoinen. Esimerkiksi säiliön korkeus on liian pieni, minkä takia potkurisekoittimen asennus on mahdotonta. (Gelperin, 1981, pp. 177 - 181)

Turbiinin ulkohalkaisija d yleensä on $(0,25 \dots 0,5) \cdot D$ riippuen viskositeetista, joten mitä korkeampi viskositeetti, sen isompi sekoittimen halkaisija on käytössä (maks. viskositeetti turbiinisekoittimelle 500 Pa·s). Avoimen turbiinisekoittimen lavan pituus on yleensä $0,25d$ -ja pyörän halkaisija on yleensä $0,75d$, kehänopeuteen 7 m/s saakka. (Nesteiden sekoituslaitteet, 2009, Luku 1.6.)



Kuva 18. A. avoin turbiinisekoitin, B. suljettu turbiinisekoitin (Nesteiden sekoituslaitteet, luku 1.6, 2009)

Turbiinisekoittimia käytetään:

- sekoittamaan nesteitä, joiden viskositeetti on korkea, max. 200 Poisia (P);
- tehokkaaseen sekoitukseen sekä nesteiden dispergointiin suurissa määrissä ($\geq 6 \text{ m}^3$)
- sekoittamaan suspensioita isokokoisien kiinteiden partikkeleiden kanssa (max. 25 mm)
- sedimentin resuspensointiin (max. 60 % kiinteätä faasia).

Turbiinin toiminnan tehoamista varten niitä voi käyttää yhdessä:

- ohjauslaitteen kanssa (dispergointiin);
- barbatointilaitteen kanssa (kaasujen ja nesteiden yhteistoiminnassa)

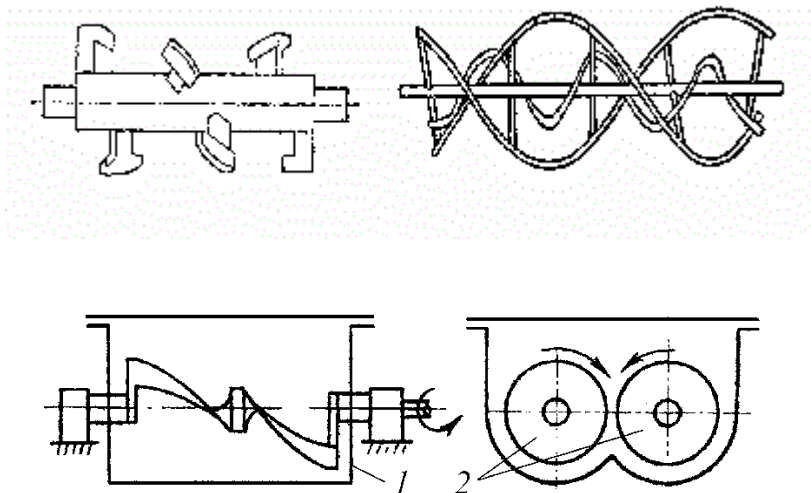
(Gelperin, 1981, pp. 177 - 181).

Ruuvisekoittimet ja nauhasekoittimet

Viskoosiset nesteet on parempi sekoittaa nauhasekoittimella, koska pyöriessään nauhat puhdistavat säiliön seinät niihin tarttuneesta massasta. Ruuvisekoitinta on mahdollista käyttää nesteille max. viskositeetti 500 Poisia ja nauhasekoittimia max. 3000 Poisia. Ruuvi- ja nauhasekoittimen periaatekuvat on esitetty kuvissa 19 ja 20. Ruuvi- ja nauha- sekoittimet voivat toimia tyhjiössä ylärajana 150 mmHg:n ylipaine. (Nesteiden sekoituslaitteet, luku 1.7, 2009)

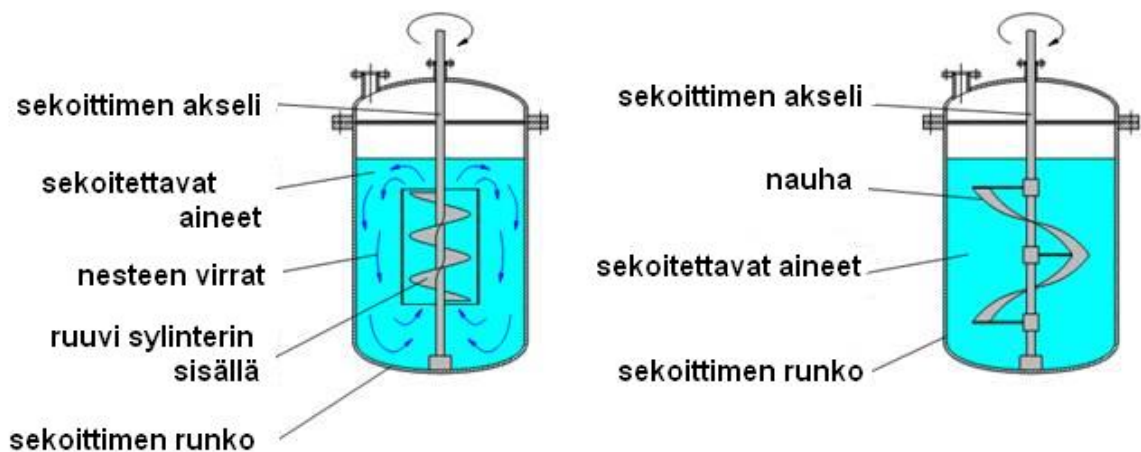
Ruuvisekoittimen heikot puolet ovat:

- huomattava energiankulutus valmismassan tilavuusyksikön suhteen
- nopea terien kuluminen,
- sekoittamisen suhteellisen huono laatu
- vaikea puhdistus,
- suhteellisesti pieni tilavuuden hyötykäyttökuorma.



Kuva 19. A. Ruuvisekoitin T-muotoisilla lavoilla; B. Hihnasekoitin, C – sekoitin Z-muotoisilla lavoilla, 1 – sekoittimen säiliö, Z – muotoiset lavat (Nesteiden sekoituslaitteet, 2009, luku 1.7.)

Jos säiliön koko on suuri, hihnasekoitin rakennetaan neljästä hihnasta. Kaksi ulkopuolista hihnaa kuljettavat sekoitettavan massan säiliöön keskiakselia päin, ja kaksi sisäistä säiliön seiniä päin. Pyörimisnopeus valitaan sillä tavalla, että ulkopuolisen hihnan kehänopeus olisi noin 1,2 m/s. Hihnasekoittimen huono puoli on sen pitkä sekoitusaika. Suurin osa hihna- ja ruuvisekoittimista on varustettu lämmitys- tai jäähdytysvaipoilla sekä tyhjiöpumppuliittimillä.



Kuva 20. Ruuvisekoittimen (vasemmalla) ja nauhasekoittimen rakenne. (Gelperin, 1981, pp. 177 - 181).

2.8.3 Mekaanisen sekoittimen laskenta

Yleisesti mekaaniset sekoittimet voidaan laskea samalla periaatteella kuin kaikki muut lapa- hydrauliset koneet. (Gelperin, 1981, p.185)

Potkurisekoittimen laskenta

Tässä työssä on tarkastelevana potkurisekoitin, joten kuvataan sen laskentaprosessi tarkemmin. Sen perustella pystymme tekemään johtopäätökset sekoittimen tehon ja tuottavuuden riippuvuudesta ja muista parametreistä. Damdinova (2000, s. 3 – 5) työn mukaan potkurisekoittimen kierrosluku voimme laskea

$$n = \frac{2 \dots 2,5}{d} + a \quad (1)$$

n – sekoittimen kierrosluku, krt/s

a – koellisesti saatu, sekoitettavan nesteen ominais kerroin, tapauksessa, jossa kerroin on tuntematon oletetaan $a = 0$.

d – potkurin halkasija, m

Kulmanopeus:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n \quad (2)$$

ω – kulmanopeus, rad/s

Potkurin askel:

$$H = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot tq\beta \quad (3)$$

H – potkurin askel

R – ympyrän säde, jota kuvaa terän äärimmäinen piste, m

β – potkurin kierre-kulma, $^{\circ}$

Vastavirran nopeus potkurin vyöhykkeessä:

$$v = H \cdot \omega \cdot \cos^2 \beta \quad (4)$$

v - vastavirran nopeus potkurin vyöhykkeessa, m/s

Tarvittava teho:

$$N = \frac{g \cdot k \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot H^3 \cdot \omega^3 \cdot \cos^4 \beta}{\eta} \quad (5)$$

N - tarvittava teho, kW

g - painovoiman kiihtyvyys, m/s^2

k - kerroin, jolla otetaan huomioon nesteen liukumista; esim. 0,85

ρ - nesteen tiheys, kg/m^3

η - höyrysuhde, esim. 0,8

Sekoittimen tuottavuus:

$$Q = 0,4 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v \cdot \rho \quad (6)$$

Q - Sekoittimen tuottavuus, kg/s

(Ilevich, 1979, pp. 176 - 220)

Yhtälöstä (6) tulee näkyviin että sekoittimen tuottavuus riippuu vastavirran nopeudesta potkurin vyöhykkeessä – v . Kun sijoitetaan yhtälöön (6) vastavirran nopeuden yhtälö (4), siitä seurauksena saadaan:

$$Q = 0,4 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot H \cdot \omega \cdot \cos^2 \beta \cdot \rho \quad (7)$$

Tuloksena saadaan että sekoittimen tuottavuus riippuu potkurin askeleesta ja kulmanopeudesta. Kun sijoitetaan yhtälöön (7) kulmanopeusyhtälö (2) sekä potkurin askelyhtälö (3), niin saadaan:

$$Q = 0,4 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \tan \beta \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \cdot \cos^2 \beta \cdot \rho \quad (8)$$

Yksinkertaistetaan lauseke (8) ja samalla sijoitetaan sekoittimen kierroslukuyhtälö (1) yhtälöön (8), niin saadaan:

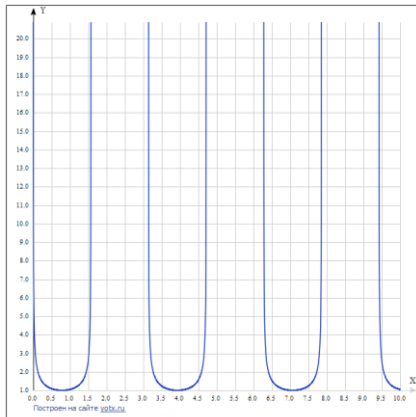
$$Q = 1,6\pi^3 \cdot \rho \cdot \frac{R^3 \cdot \sin 2\beta}{d} \quad (9)$$

Jos oletetaan että $2R = d$, saadaan seuraava yhtälö.

$$Q = 0,8\pi^3 \cdot \rho \cdot R^2 \cdot \sin 2\beta \quad (10)$$

Tärkeä johtopäätös, minkä pystymme yhtälöstä tekemään on se, että potkurisekoittimen tuottavuus riippuu nesteen ominaisuudesta (tiheydestä ρ) ja potkurin koosta ja muodosta (R - ympyrän säde, joka kuvaa potkurin terän äärimmäisen pisteen, β - potkurin kierre-kulma). Siinä on huomattava myös se, että jos tuottavuus pysyy samana (esimerkiksi

maksimaalisena) sitten $R^2 \cdot \sin 2\beta$ suuruus on kääntäen verrannollinen tiheyteen (kuvaaja on hyperbeli). Jos nesteen tiheys ja tuottavuusarvot pysyvät samana, ja vaihtelee pelkästään potkurin kierrekulma ja potkurin säde, saadaan kuvan 21 muotoinen kuvaaja potkurin koon suhteesta potkurin kierrekulmaan.



Kuva 21. Riippuvuus ympyrän säteestä, jota kuvaa potkurin terän äärimmäinen piste - R, potkurin kierrekulmasta β . (R – Y akselia pitkin, β - X akselia pitkin).

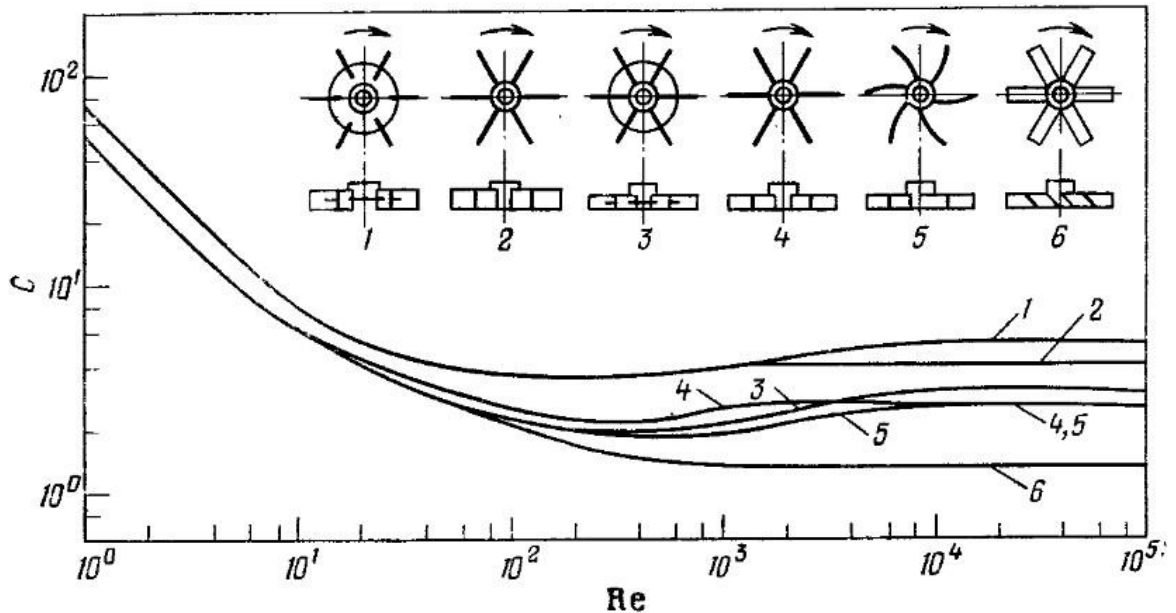
Kun tehdään samat toimenpiteet (askeleet 7 – 10) tarvittavan tehon lausekkeen (5) kanssa, niin saadaan:

$$N = \frac{64\pi^7 \cdot g \cdot (k \cdot \rho) \cdot 3 \cos \beta \cdot \sin \beta}{\eta} \quad (11)$$

Jopa näin yksinkertainen analyysi potkurin laskelmasta johtaa päätelmään että tarvittava teho riippuu nesteen ominaisuudesta ($k \cdot \rho$), sekoittimen hyötysuhteesta η ja potkurin kierrekulmasta β . Mikä tarkoittaa että energian kulutuksen suhteen sekoittimen käyttöaikana kannattaa kiinnittää huomioita sekoittimen potkurin muotojen kehittämiseen, sekä tutkimalla sekoitusaineen virtauksia, mitkä syntyvät kehitetyn potkurin mallin toiminnan tuloksena.

Monille teknologiselle prosessille, missä käytetään korkeaviskoosisia nesteitä, sekä suhteellisen korkeaa pyörimisnopeutta, voidaan käyttää tehokerrointa pelkästään Reynoldsin luvun Re mukaisesti (eli kerroin nesteen virtaamisesta sekoittimen lapojen ympäri). Näiden kertoimien numeeriset arvot saadaan kokeellisesti. Kuva 22 esittää graafisessa muodossa

tehon riippuvuutta Reynoldsin luvusta, kun on kyse radiaali-lapasekoittimesta neljän ohjauslevyn (reflective edges) kanssa. (Gelperin, 1981, p.186)



Kuva 22. Tehon riippuvuus Reynoldsin luvusta radiaali-lapasekoittimella. (Gelperin, 1981, p.186)

Aina ajankohtainen kysymys on miten määrittää optimaalinen toimintatila erityyppisille sekoittimille. Taulukossa 1 on esitetty kokeellisesti saadut optimaaliset suhteet, mitkä johtavat minimaaliseen energian kulutukseen sekoituksen aikana. (Gelperin, 1981, p.189)

Taulukko 1. Optimaaliset parametrit mekaaniselle sekoittimelle (D – säiliön halkaisija, d - sekoittimen halkaisija, n - akselin kiertoaluku)

Parametri	Sekoittimen tyyppi						
	suljettu turbiini	avoin turbiini	levy-sekoitin	2-lapainen	potkuri ilman diffuusoria	potkuri diffuusorin kanssa	ankkuri
D/d	3 - 4	3 - 4	2 - 1,5	3	3 - 4	3 - 4	1,15
n (kier./s.)	46 - 81,5	56 - 99,5	26,5 - 20	96,5	86,2 - 113	96,5 - 170	30

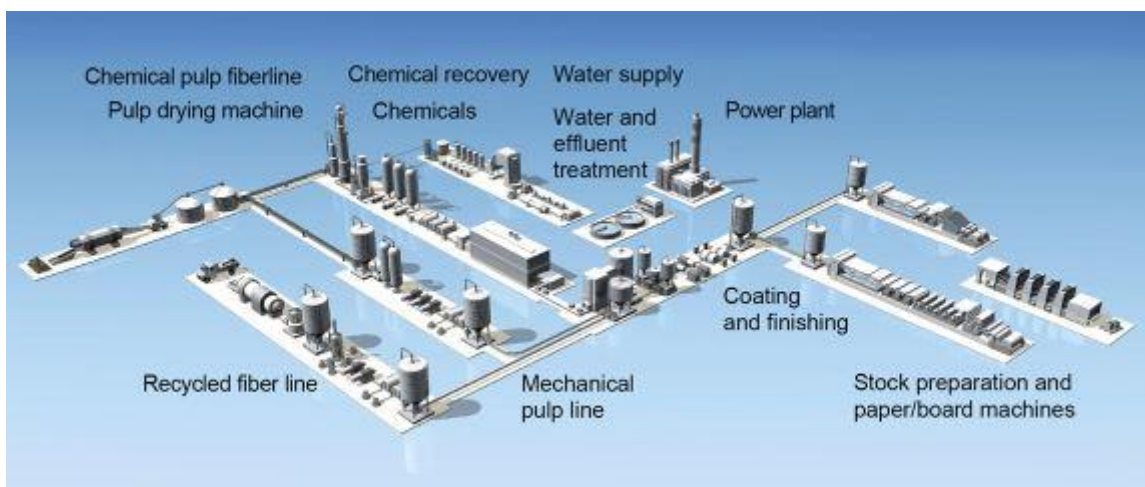
2.9 Erikoissekoittimet

Tässä työssä olen kuvannut lähinnä sekoittimien päätyypit, mutta tavallisten sekoittimien rinnalla käytetään myös erikoisrakenteellisia sekoittimia, kuten rumpusekoittimet, keskipakoisvoimasekoittimet pyörivän säiliön kanssa, kiekko-roottorisekoittimet, impellerisekoittimet, pulsaattorisekoittimet, ultraäänisekoittimet, vibraattorisekoittimet,

magneettisekoittimet sekä yhdistelmäsekoittimet. Tarkka erikoissekoittimien kuvaus ei kuitenkaan sisälly tähän työhön.

3. SEKOITTIMIEN KÄYTTÖ SELLUTEOLLISUUDESSA

Sellu- ja paperiteollisuudessa sekoittimia käytetään paljon eri tuotantolinjoissa. Kuvassa 23 on esitetty sellu- ja paperiteollisuuden tärkeimmät prosessit, joissa käytetään sekoittimia.



Kuva 23. Sellu- ja paperiteollisuuden tärkeimmät prosessit, joissa käytetään sekoittimia. (Sulzer, 2014a).

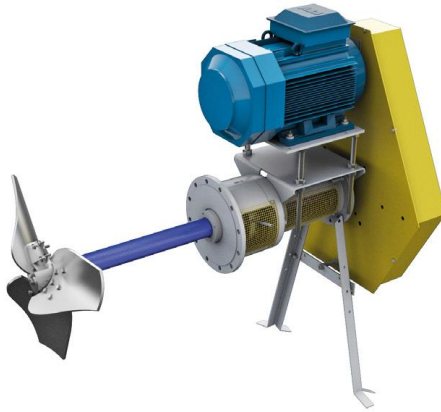
Sellu- ja paperiteollisuudessa sekoittimia käytetään seuraavissa tuotantolinjoissa:

- **sellukuitulinjassa**, missä tapahtuu sellun keittäminen, pesu, seulonta, happidelignifointi, ligniinin erotus ja valkaisu prosessit. Sekoittimia käytetään myös kemikaalien sekoittamiseen varastossa, sekä muiden nesteiden sekoittamiseen säiliöissä ja torneissa;
- **sellun kuivatuskoneessa**, mikä sisältää mm. approaching-järjestelmän, puhdistusjärjestelmän, kuivauskoneen, tyhjiöjärjestelmän, broke-järjestelmän ja nollavesi-järjestelmän. Sekoittimia käytetään massojen sekoittamiseen varastossa, sekä nestesäiliöissä että torneissa;
- **kemikaalien talteenottolinjassa**, missä tapahtuu haihdutus, soodakattila- sekä valkolipeän valmistus prosessit. Sekoittimia käytetään viherlipeän liuotussäiliöissä ja tuhkan sekoitussäiliöissä;

- **mekaanisen massan linjassa**, mikä sisältää jalostamisen, hionnan, CTMP:n (Chemical Thermo-Mechanical Pulp - selluloosan kemiallinen kuumahierrettä), seulonnan, hylätyn aineen käsittelyn ja valkaisu prosessit. Sekoittimia käytetään massojen sekoittamiseen varastoissa, neste-säiliöissä ja torneissa;
- **kierrätyskuitulinjassa**, mikä sisältää massankeiton, seulonnan ja puhdistuksen, kellutuksen, pesun ja valkaisu prosessit. Sekoittimia käytetään massojen sekoittamiseen varastoissa, muissa neste-säiliöissä ja torneissa;
- **paperi- ja kartonkikoneessa**, mikä sisältää massankäsittelyn, murskausjärjestelmän, valkovesi-järjestelmän, tyhjiöjärjestelmän, lauhdejärjestelmän, sekä suihku-vesijärjestelmän. Sekoittimia käytetään massojen sekoittamiseen varastossa sekä muissa neste-säiliöissä ja torneissa;
- **pinnoite- ja viimeistelylinjassa**, mikä sisältää pigmenttikäsittelyn ja pinnoitevärin valmistuksen. Sekoittimia käytetään massojen sekoittamiseen varastossa sekä muissa neste-säiliöissä ja torneissa;
- **kemikaalien varastossa**, sekoittimia käytetään kemikaalien säiliöissä;
- **veden- ja jätevedenkäsittelyssä**, käytetään jäteveden käsittelyprosessiin soveltuvia sekoittimia, sekä upotettavia sekoittimia. (Sulzer, 2014a)

3.1 Sellu- ja paperiteollisuudessa käytävien sekoittimien yleiskatsaus

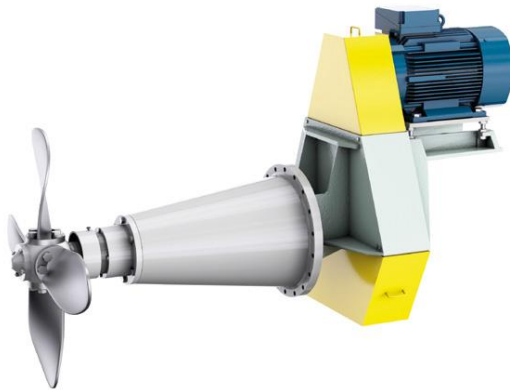
Sekoittimien mallit, mitkä ovat käytössä paperi- ja selluteollisuudessa, ovat käytössä myös muilla teollisuusaloilla, esimerkiksi elintarvike- ja jätteenkäsittelyaloilla. Tässä kappaleessa on tehty yleiskatsaus muutamista sekoitinlaitteista, joita käytetään laajasti näillä aloilla. Yleiskatsastuksen tarkoituksena on tunnistaa yhteisiä rakennekomponentteja ja erottavia pääpiirteitä. Tutkimustarkoituksen perusteella valitaan vaakasekoittimet, jotka voidaan asentaa säiliön sivuseinään. Kuvissa 24 – 25 näkyy erään laitevalmistajan sekoituslaitteet.



Kuva 24. Salomix-sekoitin (Sulzer, 2014b).

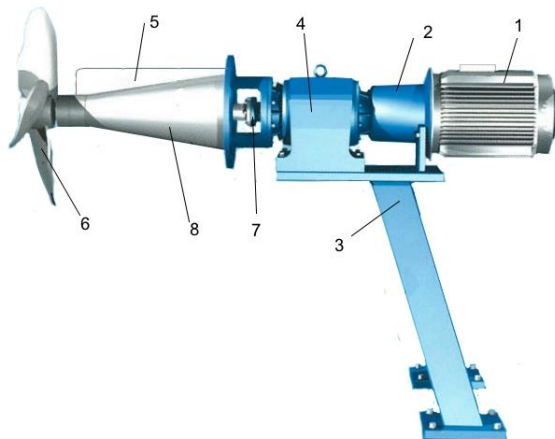
Kuvan 24 sekoitin on varustettu kolmelapaisella potkurilla, mikä on suunniteltu käytettäväksi erityisesti sellu- ja paperiteollisuudessa. Vääntömomenti moottorista potkuriin välitetään kiilahihnakäytön avulla.

Esitetyssä mallissa (Kuva 25) on erityisenä komponenttina käytetty kartionmuotoista koteloa akselille ja akselituelle. Voimansiirtona on käytetty erityyppisiä hammasvaihteita.



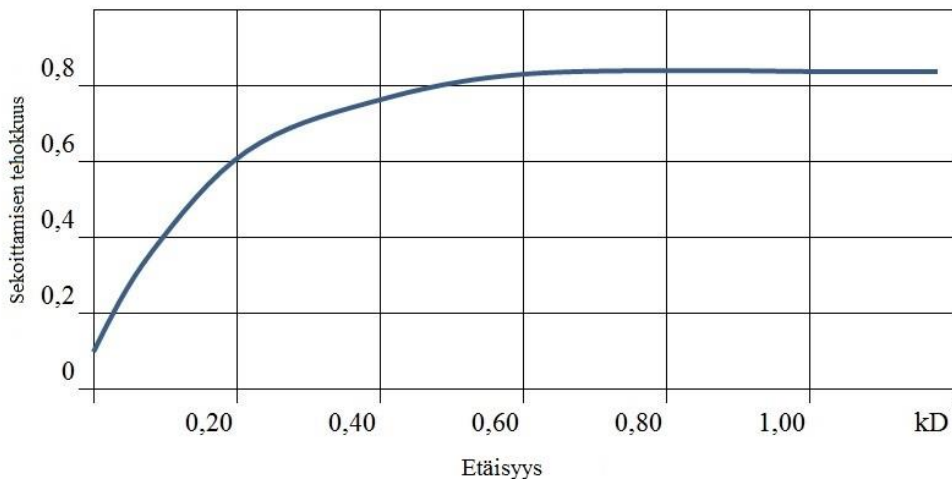
Kuva 25. SALOMIX-sekoitin, malli SLB/STB (Sulzer, 2014b)

Kuvassa 26 on esitetty Mamek Oy:n perusmalli, mikä on varustettu sähkömoottorilla 15 kW.



Kuva 26. Mamec-sekoitin. 1 - asynkroninen moottori; 2 - moottorin ohjausyksikkö; 3 – tukijalat; 4 - vaihde; 5 - ohjaukampi; 6 - potkuri; 7 - voimansiirtoakseli; 8 - kartionmuotoinen kotelo (Mamec side-entry agitators – the last word in reliability, 2002)

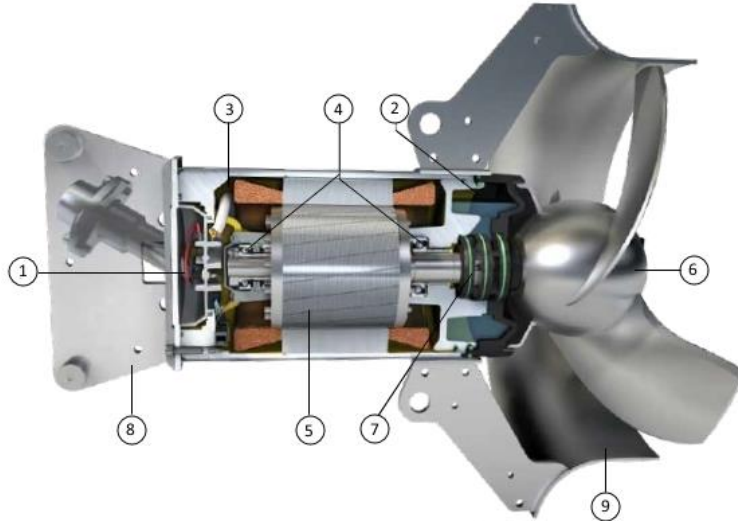
Mamec-yritys oli tehnyt kenttäkokeita muutamilla yllämainituilla sekoitinmalleilla. Niiden tuloksien perusteella oli todettu että sekoitustehokkuus riippuu aika paljon etäisyydestä potkuritason ja säiliön sivuseinän välillä. Tutkimustuloksien perusteella on luotu ”optimaalinen suhdediagrammi”, mikä kuvaa sekoitustehokkuuden riippuvuutta etäisyydestä potkurin ja säiliöseinän välillä (Kuva 27). Tutkimuksessa oli myös huomattu kartiokotelon koon ja potkurin halkaisijan välinen suhdeluku.



Kuva 27. Sekoitustehokkuuden riippuvuus etäisyydestä potkurin ja säiliöseinän välillä. D – potkurin halkaisija, k – kartiokotelon pituus, (Mamec, 2002).

Xylem-yhtiö sekoitinlaitteet, joita markkinoidaan tuotemerkillä FLYGT, ovat selvästi erityyppisiä kuin muut markkinoilla esitetyt tämän luokan sekoitinlaitteet. Merkittävä ero on virtauksen ohjauksikomponenteissa. Sekoittimen yhdessä toimitetaan virtauksen ohjauksirengas tai -paneeli, mikä estää ilman imemistä potkurin ruiskuvaan virtaan. Paneelia

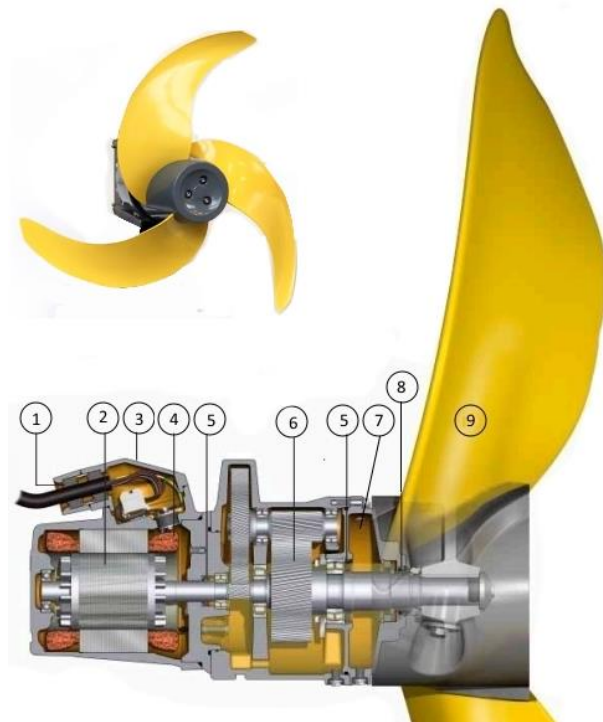
käytetään siinä tapauksessa, kun sekoitin sijaitsee lähellä sekoitettavan aineen nestepintaa. Kompaktin mallin tekninen ratkaisu on esitetty kuvassa 28.



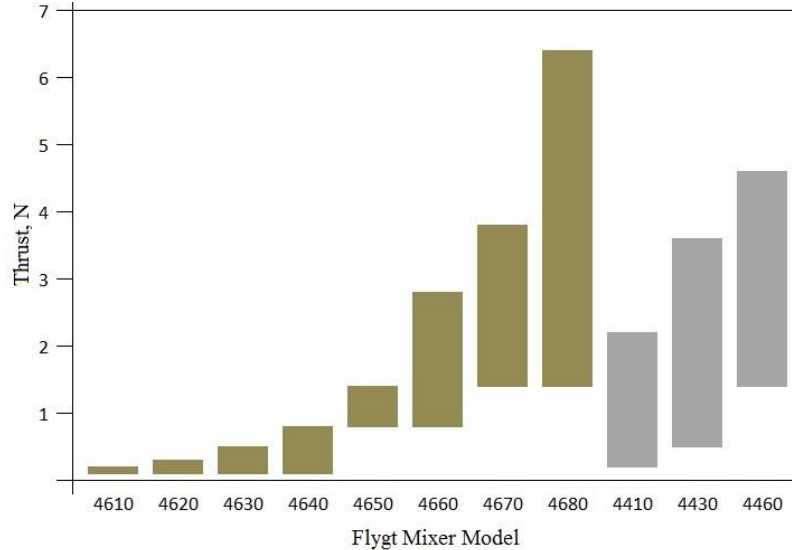
Kuva 28. FLYGT-sekoittimen kompakti malli: 1 – kaapeliliitin; 2 – öljytiivisteiden onkalo; 3 – lämpöanturi; 4 - laakerit; 5 - sähkömoottori; 6 - potkuri; 7 - tiiviste; 8 – kiinnitys ja kotelo; 9 – virtauksen ohjausrenkas. (Xylem, 2011b)

Tarkasteltessa hidaskäyntisiä FLYGT-sekoittimia voimme huomata teknisen rakenteen erikoispiirteinä kaksi- tai kolmilapaiset sapelimuotoiset potkurit. Hidaskäyntinen sekoitin on esitetty kuvassa 29.

Xylem-yrityksen asiantuntijoilla on myös mielenkiintoinen lähestymistapa sekoittimien arviointiin perustuen potkurin vetovoimaan. Tämän parametrin mukaan voidaan monipuolisesti arvioida sekoituslaitetta, koska potkurin vetovoima riippuu lähes kaikista sekoittimen teknisistä ominaisuuksista, esimerkiksi moottorin tehosta, potkurin halkaisijasta, sen pyörimisnopeudesta ja lapojen muodosta. Xylem toimittaa sekoittimien kanssa myös kiinnitys- ja tukielementit, sekä nosturilaitteet, mitkä tekevät mahdolliseksi sekoittimen asentamisen sekä säiliön kylki- että pohjaosaan. FLYGT-sekoittimien veto-ominaisuudet ovat esitetty kuvassa 30.



Kuva 29. Hidaskäytininen FLYGT-sekoitin; 1 – kaapeliliitin; 2 – sähkömoottori; 3 – kotelo; 4 - lämpöanturit; 5 - laakerit; 6 - vaihde; 7 - öljytiivisteiden onkalo; 8 – tiiviste; 9 – potkuri. (Xylem, 2011a)



Kuva 30. FLYGT-sekoittimien veto-ominaisuudet. (Xylem, 2011a)

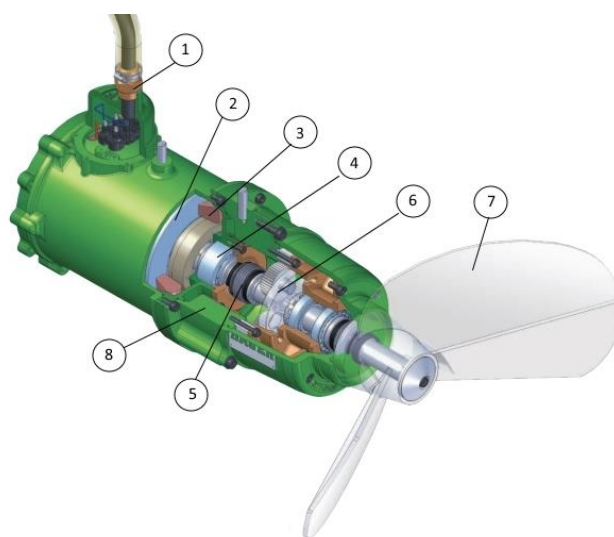
Stamo-yrityksen sekoittimien valikko kattaa koko nesteiden sekoitus teollisuusprosessien tarpeen. Stamon tekniset ratkaisut mahdollistavat sähkömoottorin vaihtoehtona ilmaturbiinin tai hydraulisen moottorin käytön voimanlähteenä. Tärkeinä rakennominaisuuksina on mahdollisuus käyttää erilaisia vierintä- ja liukulaakereita, asiakkaan tarpeen mukaan, mikä merkittävästi vaikuttaa sekoittimien hintaan. Stamon sekoittimien

voimanlähteen tehoalue on 1 – 300 kW, potkurin halkaisija on 125 – 2000 mm. alueella. Stamon erityinen toiminta-alue on vino-akselisekoittimet 450 ja 600, akselin pituus 7,5 m. asti. Nämä sekoittimet on varustettu erillisellä alatuella, mikä asetetaan säiliöön pohjaan. Tuki on varustettu liukulaakerilla, eikä vaadi erillistä huoltoa. Stamo-sekoittimet on esitetty kuvassa 31.



Kuva 31. Stamo-sekoittimet (Stamo, 2015)

Huomionarvoisia ovat myös Bauer-yrityksen sekoittimet, mitkä on suunniteltu toimimaan vaikeissa olosuhteissa. Nämä sekoittimet ovat käytössä sellu- ja paperiteollisuudessa, jäteveden puhdistuksessa ja biokaasu-energiateollisuudessa, sekä muilla vaativilla aloilla. Erikoista näissä sekoittimissa on se, että sähkömoottori upotetaan potkurin kanssa sekoitettavaan nesteeseen. Laitteen sisäinen ontelo on eristetty kotelolla ja tiiviste-elementeillä, mikä estää nesteen sisään pääsemisen ja moottorin vaurioitumisen. Sekoittimen perusrakenne on esitetty kuvassa 32. Sekoittimet on tarvittaessa varustettu myös erikokoisilla potkureilla ja asennuselementeillä, joiden avulla potkuri asennetaan sekoitussäiliöön.



Kuva 32. Upotettava sekoitin MSX, Bauer. 1 – kaapeliliitin; 2 – sähkömoottori; 3 – lämpöanturi; 4 – laakerit; 5 – tiiviste; 6 – vaihde; 7 – potkuri; 8 – kotelo. (Bauer Group Company, 2011)

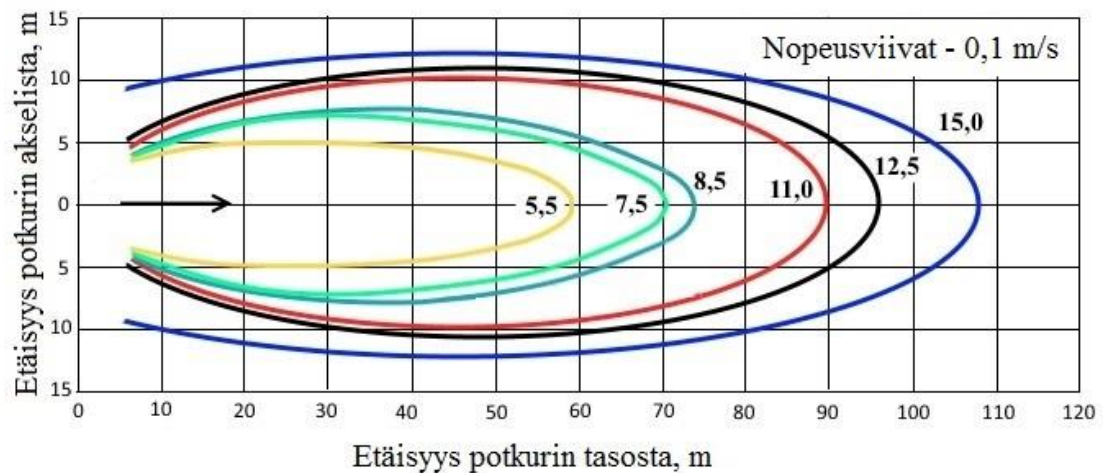
Erikoisjulkaisuissa ja temaattisissa verkkoaineistoissa on esitetty tietoja vielä vähintään kymmenestä suuresta sekä erikois- että yleiskäyttöön tarkoitettujen sekoittimien tuottajista. Laajaa skaalaa sekoittimista tarjoavat yritykset ovat Tschamber (Tschamber, 2015) ja Lightnin (Spx Flow, 2015). Kuvassa 33 on esitetty Tschamber sekoittimen MUT-mallin potkurilavan fragmentti, päätylevyllä varustettuna. Päätylevy vähentää huomattavasti häviöitä, mitkä liittyvät virtauksen (suihkujen) eroamiseen potkurilavan päädyistä ja diametraalisen (radiaalisen) virtauksen syntymiseen.



Kuva 33. Tschamber-sekoittimen MUT-mallin potkurilavan fragmentti, päätylevyllä varustettuna (Tschamber, 2015).

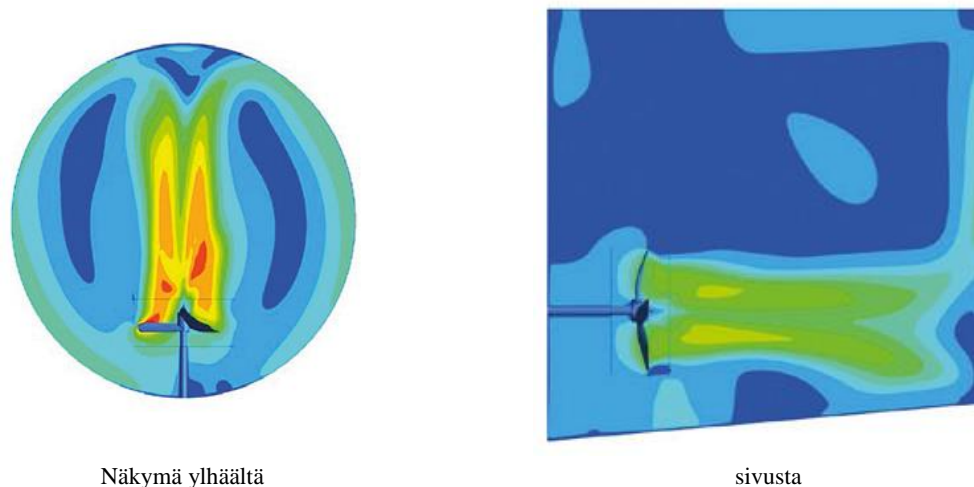
Intiassa, Kiinassa sekä Kaakkois-Aasiassa kyseisiä tuotteita toimittaa muutama yritys, jotka tuottavat kaikki laitteet paperiteollisuuden koko laajan spektrin tarpeille. Sellaisia yrityksiä ovat esimerkiksi: S.L.ENGINEERS (S. L. Exports, 2015), Shandong OUMI Machinery Manufacturing Co. (Shandong OUMI Machinery Manufacturing Co., 2015). Alan johtavat yritykset tekevät paljon kokeellista tutkimustyötä, mikä antaa mahdollisuudet optimoida sekoittimien parametrit, toteuttaa ja testata innovatiivisia ratkaisuja ja nostaa valmistuvien

laitteiden tuottavuutta ja tehokkuutta. Esimerkiksi Bauer oli toteuttanut hydrauliset koetutkimukset MSX-mallin sekoittimista, joiden tarkoituksena oli määrittää virtauksen nopeus potkuritason etäisyydellä. Tutkimuksen tulokset on esitetty kuvassa 34. Tämä kaavio mahdollistaa sekoitettavan nesteen virtauksen nopeuden määrittämisen tietyssä etäisyydessä potkurin tasosta ja siten valita sekoitin riippuen tuotantoteknologian vaatimuksista ja sekoitussäiliön koosta.



Kuva 34. Kaavio, nopeusviivat - 0,1 m/s, Bauer MSX-sekoittimet. Luvut 5,5; 7,5; 8,5; 11,0; 12,5; 15,0 – tarkoittavat sekoitinmallia (nimitys tehon mukaan). (A Bauer Group Company, 2011)

Sulzer-yrityksellä on muutama tutkimuslaboratorio, yksi niistä sijaitsee Karhulassa ja se on varustettu 30m³ kapasiteetin sekoitussäiliöllä sekä täysmittaisilla erityyppisillä sekoittimilla. Tämä varustus antaa yrityksen asiantuntijoille mahdollisuuden mallintaa eri nesteiden sekoituksessa tapahtuvia prosesseja ja optimoida sekoittimien rakenteet. Tässä laboratoriossa on myös mahdollista tehdä prosessien digitaalinen simulointi asiakkaiden tarpeiden mukaan. Erään prosessin digitaalisen simuloinnin tulokset on esitetty kuvassa 35. Kuvassa tulee hyvin näkyviin virtauksen suunnat ja seisotusalueet, jotka alentavat sekoituksen laatua ja heikentävät tuotantoteknologisen prosessin kulkua.



Kuva 35. Sekoituksen digitaalisen simuloinnin tulokset. (Sulzer, 2014b)

4. HELMIX-SEKOITTIMET JA NIIDEN KÄYTTÖ SELLUTEOLLISUUDESSA.

Tässä työssä tutkittava sekoitin on yritys Virtor Oy valmistama sekoitin Helmix HF – 80. Vaakasekoitin on tarkoitettu mm. sellu- ja paperiteollisuuden suurtilavuuden sekoitukseen. Käyttömootorin tehoalue on 15 - 300 kW.

Helmix HF - 80 on varustettu AC-induktiomootorilla 80 kW, välitys tapahtuu V-hihnalla tai hammasvaihteella. Sekoittimen tiivisteet estävät sekoitettavan aineen pääsyn laakereihin. Kosteusanturit ovat kotelon sisäontelossa. Sekoittimen akseli ja laakerit ovat suojattu kotelolla. Akselin päähän on kiinnitetty pulteilla neljä lapaa.

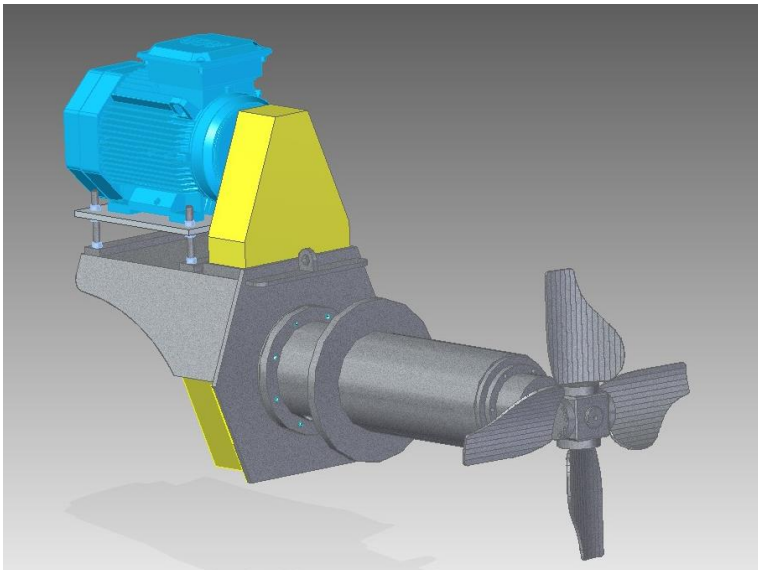
Sekoitin asennetaan säiliön kylkeen laipalla. Moottori on tuettu erikseen. Tämä keventää laippakiinnitystä ja eliminoi värinää. Sekoittimen osat, jotka ovat kosketuksessa sekoitettavan aineen kanssa, on valmistettu ruostumattomasta teräksestä EN 1.4404. Hiiliteräksestä valmistetut laitteen osat on erikoiskäsitelty ja maalattu. Sekoittimessa käytetään SEW-EURODRIVE Oy:n sähkömoottoria ja vaihdetta.

Helmix HF - 80 -sekoitin on esitetty kuvassa 36, ja kuvassa 37 esimerkki asennuksesta, valkaisu torniin kolme tangentiaalisesti asetettua sekoitinta.

Helmix-sekoittimet sopivat hyvin sekoittamiseen vaikeimmissa olosuhteissa sellu- ja paperiteollisuudessa. Niitä voidaan käyttää erilaisissa sekoitusta vaativissa prosesseissa –

kuitulinjasta jätevedenpuhdistukseen. Helmix-sekoittimia voidaan käyttää myös sellaisessa vaativassa prosessissa kuten paperimassan sekoitus. Prosessin sekoittimen valintaan vaikuttavia tekijöitä ovat:

- paperimassaan käytetyn puuraaka-aineen tyyppi;
- selluloosankeiton prosessi ominaisuudet;
- sekoitettavan massan konsistenssi;
- muut paperimassan ominaisuudet;
- sekoitussäiliön muoto;
- tuotantolinjan kapasiteetti



Kuva 36. Sekoitin Helmix HF - 80. (Virtor Oy, 2014)



Kuva 37. Esimerkki sekoittimen asetuksesta, vaakasekoittimen asetus valkaisuutornissa. (Sulzer, 214b)

5. LCA-KUVAUS JA TAVOITTEET

Elinkaariarviointi on nykyään yksi tärkeimmistä ympäristöasioiden hallinnan työkaluista EU:ssa (European Union). Se pohjautuu ISO (International Organization for Standardization) –standardeihin ja on tarkoitettu ympäristötaloudellisten ja sosiaalisten aspektien sekä ympäristövaikutusten arviointiin tuotteiden tuotannossa ja jätteenkäsittelyssä.

Elinkaariarviointia käytetään melkein kaikilla teollisuuden aloilla, muun muassa konetekniikassa, rakennuksessa, elektroniikassa, perinteisessä sekä alternatiivisessa energiantuotannossa, polymeerien ja ruoka-aineiden tuotannossa, tuotteiden muotoilussa sekä jätteenkäsittelyssä. Elinkaariarviointi on suhteellisen uusi menetelmä, mutta ei niin uusi kuin monet kuvittelevat. Jo vanhoista kirjallisista lähteistä löytyy elinkaariin liittyviä näkemyksiä.

Vuonna 1993 kansainvälinen standardisoimisjärjestön (ISO) ympäristötoksikologian ja – kemian järjestö (SETAC) on määrittänyt työssään ”A Code of Practice” elinkaariarvioinnin. Samankaltaisia nimityksiä voidaan löytää «DIN-Normenausschuss Grundlagen des Umweltschutzes (NAGUS) 1994» - nimisestä työstä ja Pohjoismaiden ympäristöministeriöiden laatimista ”Pohjoiset Menettelyohjeet” - direktiiveistä. (ISO, 2006b)

Seuraavat yleiset standardit ja tekniset raportit ovat tällä hetkellä käytössä LCA-analyysiin:

- ISO in the 14040 series (Environmental management - Life cycle assessment)
- ISO 14044:2006 Requirements and guidelines (Revises: ISO 14040:1997; ISO 14041:1998; ISO 14042:2000; ISO 14043:2000)
- CD 14047: A draft technical report presenting examples for ISO 14042 on life cycle impact assessment (in preparation)
- CD 14048: A draft standard on data format (in preparation)
- TR 14049: A technical report presenting examples for ISO 14041 on the life cycle inventory phase. Edition 1999. (Handbook on Life Cycle Assessment Operational Guide to the ISO Standards, pp 11 - 12)

Tietotekniikan nopean kehityksen ja suurten tietokantojen laatimisen ansiosta kiinnostus elinkaariarviointiin on lisääntynyt viimeisten kymmenen vuoden aikana. Yhä useampi valtiojärjestö, yritys ja tutkimuslaitos käyttävät elinkaariarviointia päätöksentekoprosesseissa sekä tuotannonkehityksen suunnitelmien laatimisessa joko tiettyjä tuotteita tai kokonaisia taloudenaloja koskevien. Euroopan markkinoilla erityistä huomiota herättävät seuraavat perusohjelmistot:

- SimaPro – Hollanti;
- GaBi - Saksa;
- UMBERTO – Ranska;
- EASEWASTE – Tanska;
- Ecoinvent v2,3 – Sveitsi.

Samalla useampien metodologioiden ja elinkaariarvioinnin ohjelmistojen kehitystyössä on eri tutkimusten analyysien tulosten vertailu tullut ongelmalliseksi, koska ei ole ollut vielä yhtenäistä metodologiaa, arviointikriteerejä eikä samanarvoisia tietolähteitä. Juuri näistä syistä on laadittu kansainvälinen standardisarja ISO 14040 - 14043, joka yhdenmukaisti

elinkaariarvioinnin metodologian ja antoi mahdollisuuden verrata eri analyysien tuloksia. (Damgaard, 2010)

5.1 Vaihtoehdot elinkaariarvioinnille (Life Cycle Assessment)

LCA:n kehityksen alkuvaiheessa, arviointiluokkien määrä oli hyvin rajoitettu, mutta tutkimuksen edetessä on vuodesta 1960 tapahtunut nopeaa kehitystä. Ja tällä hetkellä on olemassa useita vaihtoehtoja LCA:lle. Joitakin näistä LCA-varianteista käsitellään nyt lyhyesti:

Cradle-to-Grave on kokonaisvaltainen ”kehdosta hautaan” -analyysi aina raaka-aineesta (”kehto”), mukaan lukien käyttövaiheen ja siitä end-of-life vaiheeseen (”hauta”). Toisin sanoen analyysi sisältää materiaalin, prosessin ja energian raaka-aineiden hankinnan ja tuotannon, kuljetus- ja käyttövaiheen, aina tuotteen end-of-life käsittelyyn saakka.

Cradle-to-Gate – ”kehdosta portille” on osittainen elinkaariarviointi, valmistuksesta (”kehto”) tehtaan portille (eli ennen kuin se kuljetetaan kuluttajalle). Toisin sanoen, tämä sisältää kaikki prosessit raaka-aineiden hankinnasta koko tuotantovaiheen ympäristövaikutuksiin. Tuotteen käyttövaihe ja hävittäminen on yleensä jätetty pois. Cradle-to-gate -analyysiä käytetään joskus perustana tuotteiden ympäristöselosteille - environmental product declarations (EPD).

Cradle-to-Cradle – ”kehdosta kehtoon” on eri versio ”kehdosta hautaan” -arvioinnista, jossa end-of-life tai hävittämisen vaiheessa tuotetta kierrätetäänkin. Kierrätysprosessista saadaan uusia samanlaisia tuotteita (esim. lasipullot kierrätyslasipulloista), tai eri tuotteita kuten eristyslasivilla kierrätyslasipulloista.

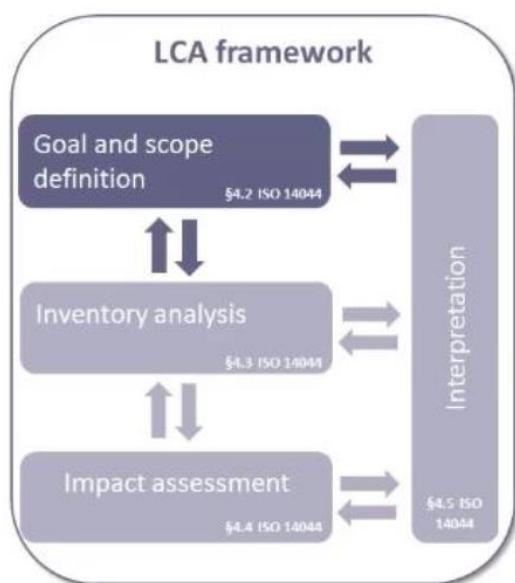
Gate-to-Gate – ”portilta portille” on osittainen LCA, joka käsittää vain yhden prosessin koko tuotantoketjussa. Siksi portilta-portille elinkaariarviointia käytetäänkin ympäristövaikutusten määrittämiseen yhdestä erillisestä tuotantovaiheesta tai prosessista.

Well-to-Wheel – tätä arviointia käytetään yleensä tieliikenteessä käytettävien polttoaineiden tehokkuuden määrittämiseksi. Analyysi on usein jaoteltu vaiheisiin, kuten well-to-station ja station-to-wheel, tai well-to-tank ja tank-to-wheel.

Economic Input Output LCA - EIOLCA, tai Economic Input-Output LCA liittyy siihen, kuinka paljon arvoja ympäristövaikutusten sektorista voidaan verrata (löytää vertausuhdearvoja) taloudelliseen sektoriin ja kuinka paljon kunkin sektorin arvojen muutokset vaikuttavat muihin sektoreihin. Tällainen analyysi voi selittää pitkiä ketjuja (esimerkiksi auton rakentaminen vaatii energiaa, mutta energian tuottamiseen tarvitaan myös ajoneuvoja, ja näiden ajoneuvojen rakentaminen vaatii energiaa). Ongelman ratkaisua LCA rajaus helpottaa hieman, mutta EIOLCA perustuu alan keskiarvoihin, jotka eivät ole tarpeeksi tarkkoja tietyn alan tai tuotteen suhteen, ja sen vuoksi eivät sovellu tuotteiden ympäristövaikutuksien arvioittamiseen. Lisäksi painotus ympäristövaikutuksien arvoista taloudellisiin ei ole tarpeeksi vahvistettu.

Elinkaariarviointi on iteratiivinen menetelmä, jolloin kaikki toimet tehdään samanaikaisesti saatujen tulosten jatkuvan analyysin sekä edellisten vaiheiden korjausten kanssa. Standardisarja määrittelee elinkaariarvioinnin periaatteet, sisällön ja vaatimukset. (Horne, 2009, pp. 173; ISO 2006a)

ISO 14040 standardin mukaan elinkaariarvioinnin tulee sisältää 4 vaihetta: tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely, inventaarioanalyysi, vaikutusarviointi ja tulosten tulkinta (Kuva 41).



Kuva 38. LCA-vaiheet (ISO 14040:2006)

5.2. Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely

Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittelyssä on määritettävä tutkimuksen tarkoitus ja tutkittavan järjestelmän rajat (ajan- ja paikkakohtaiset), kuvailtava käytettyjä tietokantoja sekä menetelmiä, joita käytetään ekologisten vaikutusten arviointiin sekä perusteltava niiden valintaa.

Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittelyvaiheissa voi olla tarpeellista tarkistaa ja korjata käytetyt parametrit, esimerkiksi lyhentämällä tarkasteltavien ekologisten vaikutusten rajoja puuttuvien tietojen takia. (Guinée, 2002. pp. 692)

Tärkeimmät elinkaariarviointi tarkoitukset ovat tuotteiden tai palveluiden kannalta seuraavat:

- kerätä tietoaineistoa tuotteen tai palvelun ekologisista vaikutuksista selvittääkseen mahdollisuudet vähentää niitä;
- antaa kuluttajalle tiedot tuotteen parhaista käyttötavoista sekä sen kierrätyksestä;
- kerätä tietoaineistoa ekosertifiointia varten (esimerkiksi saadakseen ekomerkin).

Elinkaariarviointia sovelletaan nykyään yhä useammalla alalla. Suoran tuotteen arvioinnin lisäksi elinkaariarviointia käytetään laajemminkin, esimerkiksi suurten kehitysstrategioiden laatimisessa, yhteiskuntaelämän eri osa-alueita koskevassa valtiopolitiikassa. (ISO 2006b)

5.3 Inventaarioanalyysi (LCI)

Inventaarioanalyysi (life cycle inventory analysis) vaatii enemmän aikaa ja kustannuksia, koska silloin kerätään kaikki tiedot aineiden ja energian virtojen määrästä tuotannon alku- ja loppuvaiheissa. Niiden laskentaan tuotantojärjestelmä jaetaan moduuleihin tuotteiden elinkaariarvioinnin vaiheesta riippuen (raaka-aineiden hankinta, puolituotteiden saaminen, tuotanto, realisointi, käyttö, kierrätys). Sen lisäksi tietyissä vaiheissa, etenkin teknologiselta kannalta vaikeimmissa vaiheissa, voidaan erottaa yksikköprosessit, jotka vastaavat yksittäisiä tuotantoprosesseja. (ISO 2006a; ISO 14040) Esimerkiksi polyeteenikalvopakkausten puolivalmisteen tuotannossa on tarkoituksenmukaista erottaa seuraavat moduulit: granuloiden sulattaminen, ekstruusio, jäähdytys ja kalvon pakkaaminen.

5.4 Vaikutusarviointi (Life Cycle Impact Assessment, LCIA)

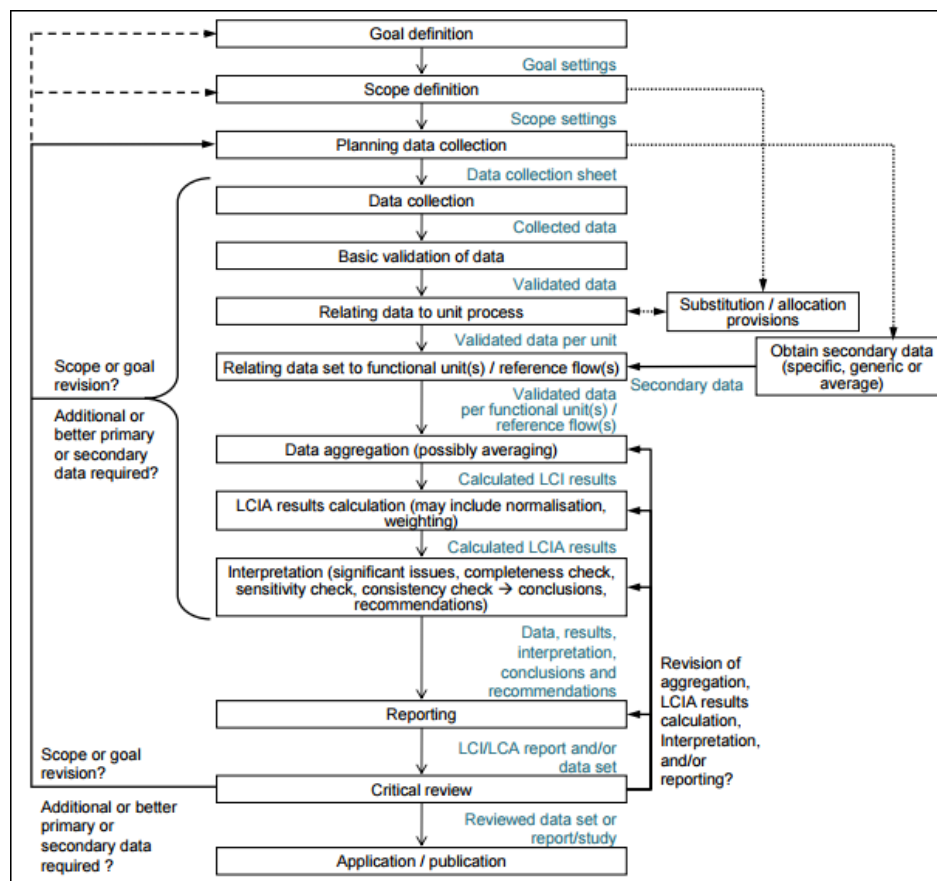
Vaikutusarviointi (life cycle impact assessment) eli mahdollisten ympäristövaikutusten merkittävyyden arviointi tehdään inventaarioanalyysin perusteella ja se on metodologisesti kyseenalaisin elinkaariarvioinnin vaihe. Tässä vaiheessa on ensisijaisesti järjestettävä edellisessä vaiheessa vahvistetut ympäristövaikutukset vaikutuskategorioiden (mineraalivarojen ja energian käyttö, myrkyllisten jätteiden muodostuminen, stratosfäärin otsonikerroksen tuhoaminen, kasvihuoneilmiö, biodiversiteetin väheneminen, ihmisen terveydelle aiheutetut vauriot yms.)

Tämän jälkeen on kvantitatiivisesti eli määrällisesti kuvailtava jokainen kategoria ja verrattava eri vaikutteita vastatakseen kysymykseen siitä, mikä niistä aiheuttaa suuremman haitan ympäristölle (esimerkiksi kasvihuonekaasupäästöt tai maanpinnan kulutus eli eroosio). Vaikutusten arviointia varten on laadittu metodiikkoja (ja vastaavia ohjelmistoja), joista yhtäkään ei voi pitää universaalina eikä subjektiivittomana. (ISO 2006b)

5.5 Tulosten tutkinta

Elinkaariarviointin viimeisen vaiheen tarkoituksena on laatia suosituksia haitallisten ympäristövaikutusten minimoimiseksi. Tuotteiden ekologisuuden parantaminen elinkaariarvioinnin suositusten ansiosta tuo lopulta useampia ekologisia (kuten esimerkiksi tuotteiden valmistukseen käytettävien materiaalien ja energian vähentäminen) ja taloudellisia (esimerkiksi raaka-aineiden hankintakustannusten vähentäminen, ekologisen kuluttamisen kasvu, laitoksen taloudellisen imagon parantaminen) etuja.

Vaikka elinkaariarviointi koostuu neljästä vaiheesta, se on toistuva prosessi, jolloin arvioinnin myöhäisessä vaiheessa saatu tulos voi johtaa edellisten vaiheiden muuttamiseen. (ISO 2006b) Kuva 39 antaa yleiskuvan tärkeimmistä vaiheista LCA-tutkimuksen toteuttamiseen.



Kuva 39. LCA iteratiivinen lähestymistapa, jossa keskitytään inventaariotiedonkeruuseen (ILCD Handbook: General guide for Life Cycle Assessment. Provisions and action steps, 2010).

6. HELMIX-VAAKASEKOITTIMEN LCA

6.1 Yleiset näkökohdat

Työssä tarkastellaan Helmix-sekoittimen koko elinkaarta eli kyseessä on niin sanottu cradle-to-grave tarkastelu. Tavoitteena on arvioida Helmix-sekoittimen elinkaaren vaikutusta ilmaston lämpiämiseen (GWP, Global Warming Potential). Tarkastelussa käytetään GaBi-ohjelman tietokantaa. Työssä tarkastellaan Helmix HF-80 vaakasekoittimen valmistusta ja sen käyttöä selluteollisuuden valkaisuosastossa. Tarkastelun kohteena on raaka-aineiden jalostuksesta tuotteen käytön jälkeiseen käsittelyyn ulottuva elinkaari (cradle-to-grave). Tässä tarkastelussa sovelletaan elinkaariarviointimenetelmää. Työn tavoitteesta johtuen tarkasteluun riittää alhaisen vaatimustason tieto. Tässä työssä sitä ei vertailla muihin järjestelmiin, eikä myöskään suoriteta kriittistä arviointia.

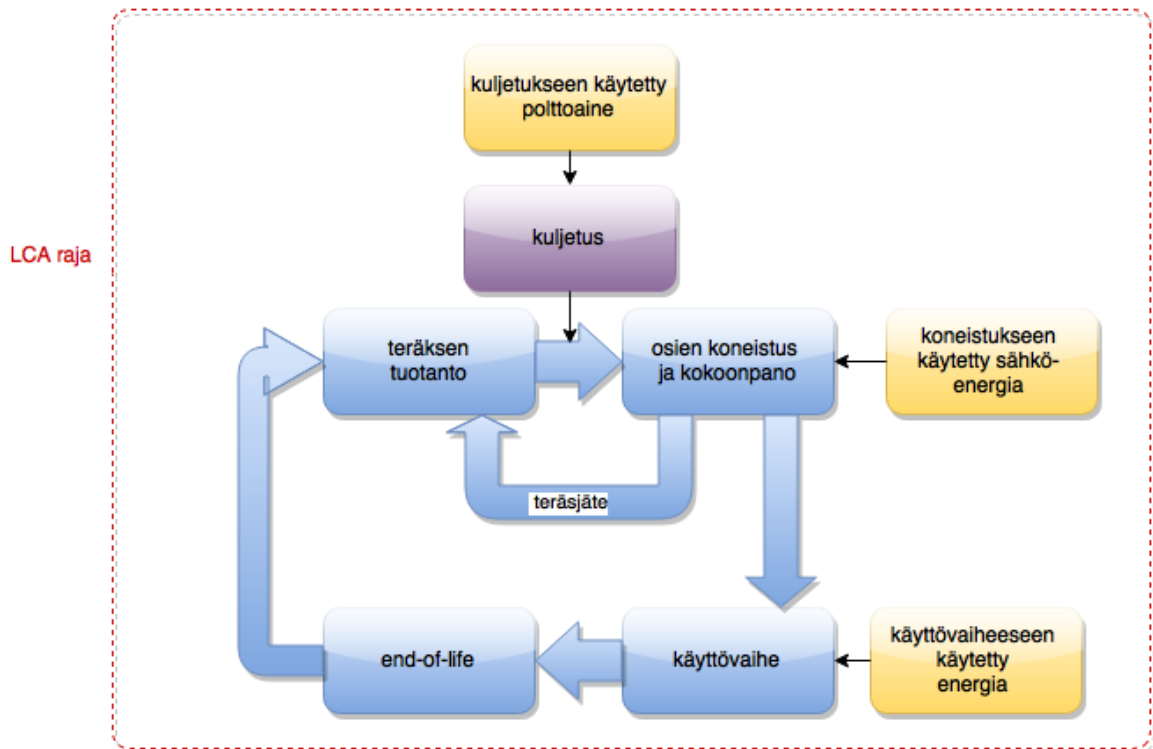
Tämän elinkaariarvioinnin selvityksen tekijä on Lappeenrannan Teknillisen Yliopiston opiskelija Larisa Kharlukova. Raportti on valmistunut marraskuussa 2015. Tämä selvitys on toteutettu ISO 14044 kansainvälisen standardin vaatimusten mukaisesti.

6.2 Helmix-vaakasekoittimen LCA tavoitteet

Helmix-vaakasekoittimen LCA analyysi on laadittu yritykselle Virtor Oy sekä Lappeenrannan Teknilliseen Yliopistoon opiskelijan diplomityönä. Työn tarkoitus on selvittää, missä elinkaaren vaiheessa Helmix-sekoitin aiheuttaa enemmän ympäristövaikutuksia ja miten niitä voi pienentää ja miten sitä tehdään. Helmix-sekoittimesta laaditaan elinkaariarvio ja siitä tehdään ISO 14044 standardin mukainen raportti. Työ käytetään Virtor Oy yrityksen tarpeisiin ja julkistetaan normaali DI-työtavan mukaan.

6.3 Järjestelmän rajat

Tarkastelun kohteena on raaka-aineiden jalostuksesta tuotteen käytön jälkeiseen käsittelyyn ulottuva elinkaari (cradle-to-grave). Tarkastelussa sovelletaan elinkaariarviointimenetelmää.



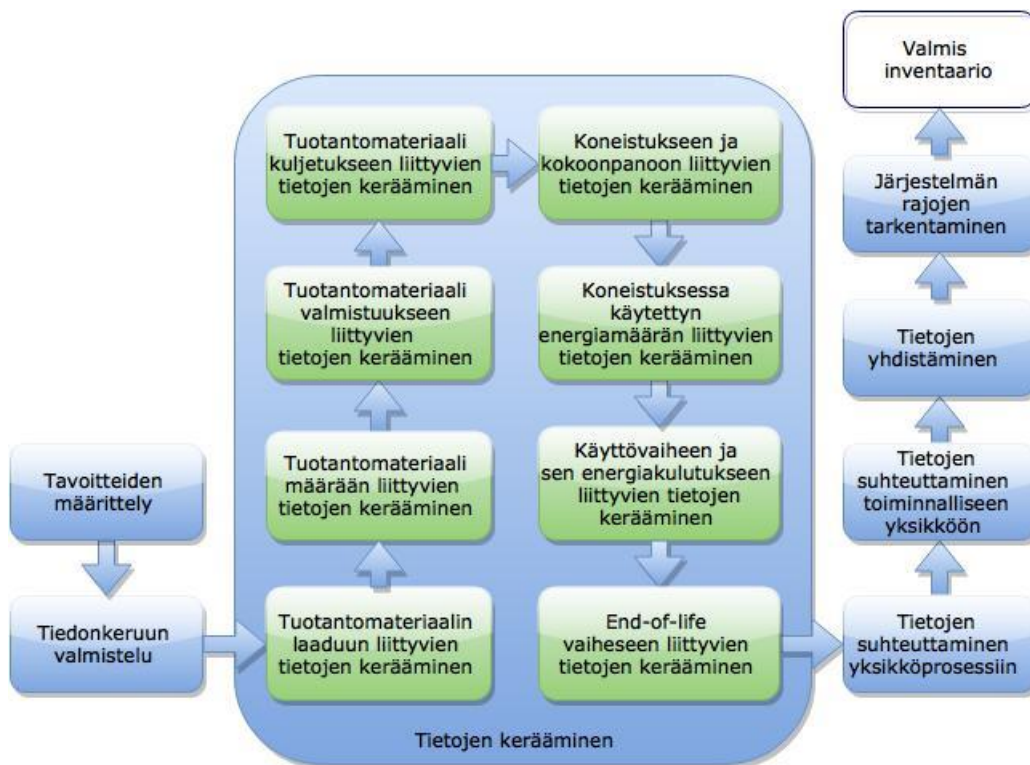
Kuva 40. Järjestelmän rajat.

Tarkastelun kohteena on raaka-aineiden jalostuksesta tuotteen käytön jälkeiseen käsittelyyn ulottuva elinkaari (cradle-to-grave). Tilannetta ilmaisee kuva 40. Punaisella katkoviivalla on merkitty LCA- raja. Helmix-sekoittimen kokoelinkaariarviointisuunnitelma sisältää teräksen tuotantoprosessin, teräksen valssauksen, osien koneistuksen ja kokoonpanoprosessit, sekä koneistukseen käytetyn sähköenergian, sekä End of Life-vaiheen, minkä jälkeen teräs palautetaan takaisin tuotantoon. Analyysissä tarkastellaan yhtä Helmix HF-80 -vaakasekoitinta. Kertoimet ja laskenta-arvot kerätään inventaarioanalyysin vaiheessa, mikä kuvataan kappaleessa 6.3. Arvojen tarkastelussa sovelletaan elinkaariarviointimenetelmää.

6.4 Helmix-vaakasekoittimen LCA inventaarioanalyysi (LCI)

6.4.1 LCI alkuvaihe

Tässä kappaleessa käsitellään LCI - Life Cycle Inventory eli tiedonkeruuvaihetta Helmix-vaakasekoittimen kokoelinkaariarvioinnissa. Tiedonkeruu toteutetaan alla esitetyn prosessinkulkukaavion (Kuva 41) mukaisesti.



Kuva 41. Sekoittimen LCI prosessinkulkukaavio.

Helmix-sekoittimen LCI prosessinkulkusuunnitelma sisältää seuraavat vaiheet: tavoitteiden määrittely, tiedonkeruun valmistelun, selvitys sekoittimen tuotantomateriaalista, selvitys tarvittavan tuotantomateriaalin määrästä, teräksen valmistuksen liittyvien tietojen kerääminen, teräksen kuljetuksen liittyvien tietojen kerääminen, sekoittimen osien koneistukseen ja sekoittimen kokoonpanoon liittyvien tietojen kerääminen, sekä arvioidaan koneistusvaiheessa kulutettu energia, ja seuraavaksi kerätään End-of-life vaiheen liittyviä tietoja, tietoja suhteutetaan yksikköpörsseihin ja toiminnalliseen yksikköön, ja yhdistetään.

Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittelyvaihe (kuva 41) pohjautuu kappaleeseen 6.2. jonka perusteella inventaarioanalyysin tiedonkeruu valmistellaan. Tiedonkeruun valmistelun vaiheessa analysoidaan tiedonkeruuprosessin kulkua ja tehdään LCI prosessikulkukaavio.

Tietojen kerääminen kattaa kaikki laadulliset ja määrälliset tiedot, jotka liittyvät järjestelmän rajojen sisään kuuluviin yksikköprosesseihin. Tietojen keräämiseen vaiheessa tehdään selvitys sekoittimen tuotantomateriaalin laadusta, arvioidaan tarvittavan materiaalin määrä sekoittimen tuottamiseen, käsitellään tuotantomateriaalin – tässä tapauksessa ruostumatonta erästä tuotantoprosessia, muu muassa etsitään kirjallisuudesta maapallon ruostumattoman teräksen yhden kilon valmistusta vastaavat kertoimet ilmaston lämpenemisen potentiaali Global Warming Potential (GWP 100 years), CML2001- järjestelmän mukaisesti LCA-analyysiä varten. Sen jälkeen arvioidaan tuotantomateriaalin kuljetusta tehtaan, tässä tapauksessa teräksen 1 kg kuljetusta 1 km matkaan vastaavat kertoimet ilmaston lämpenemisen potentiaalista. Sekoittimeen koneistukseen ja kokoonpanoon liittyvien tietojen keräämiseen vaiheessa arvioidaan Helmix-sekoittimen osien koneistusprosessia, ja myös lasketaan koneistuksesta jäävän teräsjätteen määrä, mikä palaa takaisin sulattamoon – teräksen valssausprosessiin. Seuraavaksi arvioidaan koneistuksen aikana käytetty sähköenergiaan määrä ja myös 1 kW/h vastaavat kertoimet GWP 100 years, CML2001- järjestelmän mukaisesti. Käyttövaiheen ja sähkönkulutuksen käyttövaiheessa liittyvien tietojen keräämisen osassa käsitellään Helmix- sekoittimen käyttövaihetta ja sähkön kulutusta käyttövaiheessa, sekä 1 kW/h vastaavat kertoimet GWP 100 years, CML2001- järjestelmän mukaisesti. End-of-life vaiheeseen liittyvien tietojen keräämisen osa käsittelee sekoittimen elinkaaren loppuvaihetta, eli tässä tapauksessa teräsosien kierrätysprosessia, ja 1 kg kierrätettävää jäteterästä vastaavat GWP 100 years, kertoimet, seuraavaa LCA-vaihetta varten.

Kunkin yksikköprosessin syötteet ja tuotokset suhteutetaan yksikköprosessiin ja edelleen toiminnalliseen yksikköön. Järjestelmän rajojen tarkentamisessa tehdään herkkyysanalyysi, jossa määritetään tietojen merkittävyys. Sellaiset yksikköprosessit, syötteet ja tuotokset, jotka ovat herkkyysanalyysin mukaan merkittäviä, otetaan tässä vaiheessa mukaan ja vastaavasti sellaiset jotka eivät ole herkkyysanalyysin mukaan merkittäviä, voidaan jättää pois.

6.4.2 Sekoittimen tuotantomateriaali.

Tässä työssä tehdään LCA-analyysi pelkästään sekoittimen teräsosista, joten sähkömoottori ja vaihde jäävät LCA-rajojen ulkopuolella eli niitä ei käsitellä. Sen takia voimme päätää että sekoitin on valmistettu pelkästään teräsosista.

Valmistuksen materiaali on ruostumaton teräs EN 1.4404 (stainless steel). Analogiset materiaalin nimikkeet erilaisten standardien mukaan ovat annettu taulukossa 2. Yleensä käytetään Suomen Outokumpu Oyj tai Belgian ArcelorMittan valmistamaa terästä.

Taulukko 2. Materiaalin EN 1.4404, teräs, nimikkeet erilaisten standardien mukaan.

AISI	ГОСТ	EN 10088-3:	AFNOR	BS	DIN	SIS
316L	03X17H14M3	1.4435 / X2Cr NiMo18-14-3	Z3CND17-12-03 Z3CND18-14-03	316S11	1.4435	2353
	03X17H14M2			316S13		

Tämän terästyyppin tiheys on 8000 kg/m^3 ; teräksen luokka - rakenneteräs, kryogeeninen, austeniittiset teräkset; käyttöluokka - hitsattuja rakenteita, käytetään aggressiivisessa ympäristöissä, lämpötiloissa jopa $-196 \text{ }^\circ\text{C}$ asti; Muut teräksen mekaaniset ominaisuudet löytyy liitteessä 3. Taulukko 3 esittää teräksen kemiallisen koostumuksen.

Taulukko 3. Teräs EN 1.4404, ominaisuudet

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo
> 0,03	> 0,4	1 - 2	13 - 15	> 0,02	> 0,035	16 - 18	2,5 - 3,1

Kuten taulukossa 8 on esitetty, on tämän tyyppisessä austeniittisessä teräksessä suuri määrä molybdeenia, joka lisää korroosionkesto-ominaisuuksia, ja sillä on erinomainen sitkeys kryogeenisissä lämpötiloissa. Näitä teräksiä käytetään paikoissa, jotka edellyttävät suurta lujuutta, korroosionkestävyyttä ja hitsattavuutta. Tämä teräslaji on sovellettavissa sellaisilla aloilla kuten lääketiede-, elintarvike-, öljy- ja kaasuteollisuus.

GaBi-ohjelman datatiedot ruostumattomasta teräksestä ovat puutteelliset, tarkkaa arvoa nimenomaan tämän teräksen lajin kohdalta ei löytynyt. Mahdollisimman lähellä olevan teräslajin tiedot ovat Stainless Steel slab (X12CrNi17-7) tai Stainless Steel slab (X6CrMo17-1). Niistä tuotantoprosesseista on lähempi Stainless Steel slab (X6CrMo17-1) teräksellä, koska se sisältää Molybdeenin seosta. (Gabi-software data)

6.4.3 Käytetyn sekoittimen valmistuksessa teräksen paino

LCA-analyysien tekemiseen tarvitaan kokonaisteräspaino, mitä on käytetty sekoittimen teräsosien valmistuksessa. Teräsosien paino yleensä on ilmoitettu valmistuspiirustuksista, mistä se onkin poimittu, sekä Helmix-sekoittimen osaluettelosta (Liite 1). Kiinnityselementit, kuten ruuvit, mutterit, tasakiilat, o-renkaat ja kierretangot on jätetty pois analyysistä. Niiden paino on yhteensä noin 1 kg, mikä on noin 0,5 % koko sekoittimen teräsosien painosta, mikä ei siten vaikuta huomattavasti analyysin tuloksiin.

Sähkömoottori samoin, kuin vaihde jätetty LCA-analyysin ulkopuolelle eikä niitä ole laskelmassa mukana. Tämän päätöksen syynä oli tietojen puutteellisuus moottorin ja vaihteen valmistusprosesseista. Sekoittimen Helmix HF-80 osien valmistuksessa käytetty kokonaispaino ilman moottoria on noin 283 kg (Taulukko 4). Bruttopaino tarkoittaa raaka-aineen, teräsaihion painoa ennen osan koneistusta.

Taulukko 4. Helmix HF-80 sekoittimen valmistukseen käytetty teräksen paino

	Osa	Brutto paino, kg	Kpl.	Brutto kok. paino, kg
Sekoitinrunko				
	Tukirengas	4,4	1	4,4
	Kiinnityslaippa	30,2	1	30,2
	Laippa + putket	15,7	1	15,7
	Laippa	47,5	1	47,5
	Runkoputki	39,8	1	39,8
	Sekoitinakseli	72,5	1	72,5
	Tiivistepesä	50,4	1	50,4
	Liukuholkki	1,05	1	1,05
	Tiivisteen suojus	0,9	1	0,9

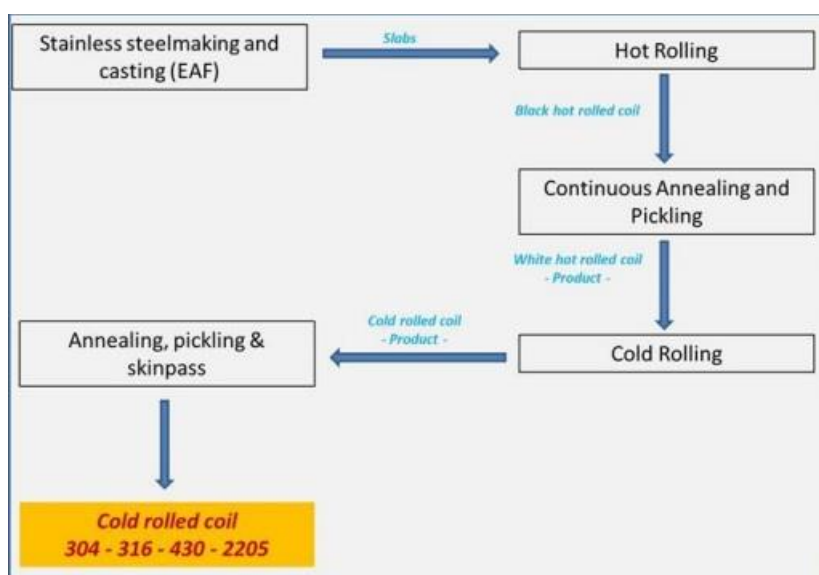
	Lukituslevy	0,2	1	0,2
Potkuri koottuna				
	Siiven keskitappi	0,02	4	0,08
	Napa	20,1	1	20,1
	Potkurin siipi	5	4	20
Yhteensä:				283

6.4.4 Ruostumattoman teräksen tuotanto

Prosessin kuvaus: ruostumattomat teräkset on valmistettu seoksista, mikä sisältävät ruostumattoman teräksen romua (stainless scarp), hiiliteräksen romua (carbon steel scarp) ja rautaseoksia (ferro-alloys), Cr-, Ni- ja Mo-osuudet näissä raaka-aineissa voivat vaihdella suuresti riippuen teräslajista.

Aluksi raaka-aineet sulatetaan valokaariuunissa (EAF); sitten nestemäinen metalli siirretään decarburising-säiliöön (yleensä "argon happea decarburising", AOD-), jossa se puhdistetaan puhaltamalla argonin, hapen, typen kaasuseoksina. Sen jälkeen sulava teräs viimeistellään senkkauunissa (LF), jossa on hienosäädetyt kemialliset prosessit ja lämpötila on optimoitu (Liite 2). Sulasta teräksestä valetaan, jatkuvalla valumalla, puolivalmiita suorakulmaisista terästuotteita, kuten "laattoja" ("slabs" tai "billets"). Laatat muunnetaan suorakulmaisiksi (quarto) levyiksi tai pitkäksi kelaksi uudelleen lämmittämällä ja kuumavalssaamalla (hot-rolling). Seuraava lämpökäsittely (hehkutus - annealing) sekä happopuhdistus (peittaus - pickling) ja litistäminen tuottavat valmiin kvartto-levyn tai valkoisen kuumavalssatun kelatuotteen (white hot rolled coil).

Vaihtoehtoisesti, valkoinen kuumavalssattu kela käytetään raaka-aineena tuottamaan ohuempia kelatuotteita kylmävalssaamalla. Valkoinen kuumavalssattu kela kylmävalssataan; niin että se pehmennetään ja happopeitataan tai kiilto-hehkutetaan, ja litistetään (viimeistelyvalssausrullataan) muodostamaan kylmävalssattua kelatuotetta (Cold Rolled Coil). (GaBi data base)



Kuva 42. Cold Rolled Stainless Steel manufacture process (Outokumpu, 2014a.)

Sekoittimen valmistuksessa käytetään yleensä kylmävalssattuja terästuotteita, mutta kuumavalssattujen tuotteiden käyttö on myös mahdollista tietyissä tapauksissa. Tässä työssä on laskettu, että 100 % teräsmateriaalista on kylmävalssattua. Kylmävalssattu teräksen tuotantoprosessikaavio on esitetty kuvassa 42.

Kylmävalssattuun teräksen GWP (Global warming potential) kerroin löytyy esimerkiksi Environmental Product Declaration Outokumpu esitteestä, ja se on 3550 kg CO₂-Eq., mikä vastaa 1 tonnia kylmävalssattua ruostumattoman terästuotetta, eli 3,55 kg CO₂-Eq. / 1 kg terästä.

Sama arvo kuumavalssattua terästä varten on 2750 kg CO₂-Eq. / 1 tonni kuumavalssattu terästuotetta, eli 2,75 kg CO₂-Eq. / 1 kg terästä. Arvo on pienempi kuin kylmävalssatun teräksen kohdalla, sillä tuotantoprosessiketju on myös lyhempi. (Outokumpu, 2014a.)

Laskenta sisältää raaka-aineiden hankinnan, kuljetuksen ja valmistusprosessit, mitkä kuuluvat Outokumpu 316L terästuotteiden tuottamiseen. Analyysi pohjautuu tietokantaan GaBi 5 Software.

Taulukossa 5 on esitetty GWP arvot yhden Helmix HF 80 -sekoittimen valmistukseen käytetyn 283 kg teräksen tuottamisesta.

Taulukko 5. GWP arvot sekoittimen valmistukseen käytetyn teräksen tuottamisesta

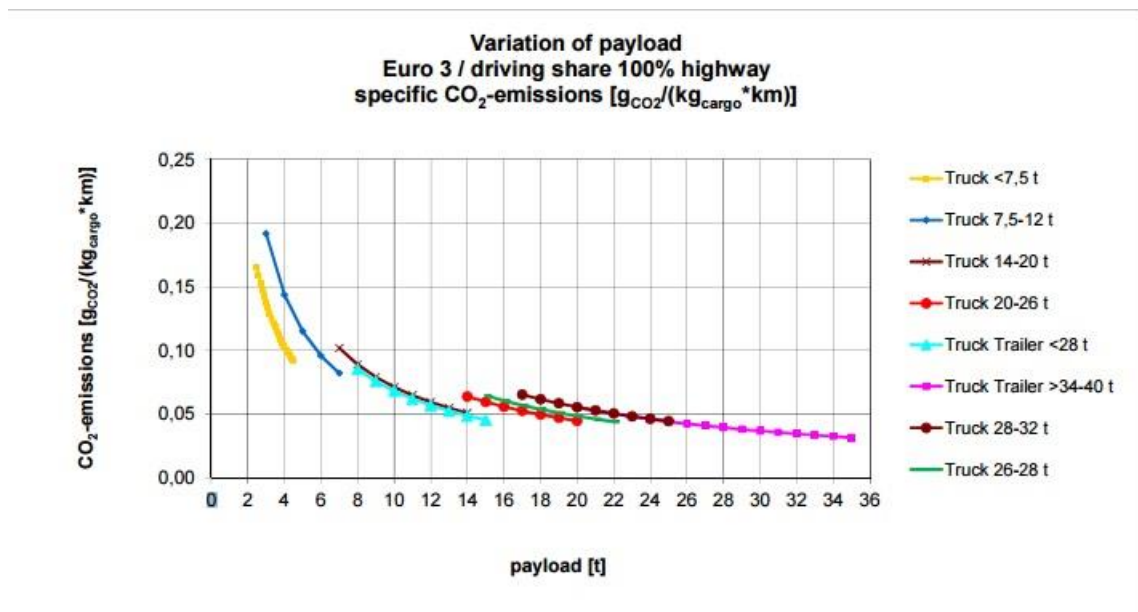
Teräs laji	Teräksen paino, kg	Kerroin GWP, kg CO ₂ -Eq. / 1 kg	GWP, kg CO ₂ -Eq.
Kylmävalssattu	283	3,55	1005
Kuumavalssattu	283	2,75	778

Kuumavalssatun teräksen tuottamisessa keskimääräinen metalliromun pitoisuus on 95 %, niistä ruostumattoman teräksen romupitoisuus 35,9 % (Outokumpu, 2014a, pp. 4-5), ja loput 59,1 % on korkeahiilipitoista rautaromua, esimerkiksi valurautaromua. Koko 95 % metalliromua vastaava osuus on ilmoitettu luottomodulissa (a credit in module). Tämä tarkoittaa, että jokaista 1 000 kg tuotettua kuumavalssattua ruostumatonta terästä kohden on 359 kg ruostumatonta terästä tuotettu romusta.

6.4.5. Teräksen kuljetus

Prosessin kuvaus: tässä osassa kuvataan kuljetusprosessi hyötyajoneuvojen ja kuljetettavan rahdin suhteen [kg]. Prosessi käsittelee käytettyä polttoainetta ja päästöjä. Oletuksena on polttoaineen kuljetuksessa toiminnallinen yksikkö 1 kg lasti / 100 kilometrin matka. Laskelmassa ei ole huomioitu kulkuneuvon käyttöastetta / kuormitusta, ja tieluokkia (kaupunkiliikenne / maaseutu / moottoritie) ja polttoaineen rikkipitoisuutta ja kokonaista hyötykuormaa (total payload) eikä pakkausmateriaalia. Kuorma-autojen tuotanto, trukin end-of-life ja polttoaineen toimitusketju eivät myöskään sisälly laskelmaan.

Tässä tapauksessa oletetaan että kuljetus toteutetaan pienellä diesel-polttoaineella toimivalla rekka-autolla ja sen kantokyky on 12 - 14 tonnin kokonaispaino / 9,3 t. hyötykuorma. Kulkuneuvon kantokyvyllä on merkitystä GWP vaikutukseen. Kuvasta 43 näkyy, että kuljetus pienillä kuorma-autoilla, kuormankantokyvyllä alle 12 tonnia, tuo enempi CO₂ päästöjä, ja kaikkein vähiten päästöjä saadaan kuljetuksesta kuorma-autolla perävaunun kanssa, kuormankantokyvyllä > 34 - 40 tonnia.



Kuva 43. CO₂ päästöt kuljetuksesta. (Thinkstep Global, 2012, GaBi 5)

Helmix sekoittimen tuotannossa Virtor Oy käyttää Outokumpu Oy:n Suomessa valmistamaa ruostumatonta terästä. Sekoittimien valmistuksessa on myös käytetty Belgiassa valmistettua terästä, minkä valmistuspaikka on Gent-kaupungissa sijaitseva ArcelorMittal tehdas. Sekoittimen valmistuspaikka on Oripää, missä sijaitsee Virtor Oy tehdastila. Etäisyys on maanteitse paikasta Gent paikkaan Oripää 1959 kilometriä. Etäisyys on maanteitse paikasta Tornio paikkaan Oripää 701 kilometriä (välimatka). Kuljetettava kuorma on 283 kg.

Taulukko 6. Polttoaineen kulutus teräsaihioiden kuljetuksessa

	Matka, km	Diesel kulutus, l	Lasti, kg	Diesel kulutus, kg
Suomi	701	5,3	283	4,3
Belgia	1959	14,7	283	12,1

Taulukko 6 kuvaa polttoaineen kulutusta teräsaihioiden kuljetuksessa. Laskelmassa on käytetty seuraavia arvoja:

- diesel-polttoaineen paino – tilavuus suhde (laskettu tiheydestä) 0,821 – 0,826 kg/l.
Taulukkoarvojen laskelmassa on käytetty keskiarvoa 0,824 kg/l.

- 1 kg lastin kuljetuksessa 100 kilometrin matkaan kulutetaan 0,002 kg dieseliä (GaBi gabi-software data, diesel driven, Euro 3, cargo, consumption mix).

6.4.6 Osien koneistus ja kokoonpano

Prosessin kuvaus: tässä osassa kuvataan teräksen CNC-koneistusprosessi, sekä sekoittimen kokoonpano. Koneistus on yleinen termi, mikä kuvaa erilaisia materiaalin käsittelyä (poisto)prosesseissa, kuten sorvaus, jyrsintä, poraus, muotoilu, hionta, katkaisu jne. Terän avulla poistetaan ei-toivottu materiaali työkappaleesta, jotta saadaan haluttu muoto. Prosessin tuloksena saadaan erilaisia geometrisiä muotoja teräskappaleista. Koneistuksesta jättemateriaalina jäävät teräslastut, ja niiden määrä on yleensä hyvin merkittävä. Tämä laskenta vaatii poistomateriaalin määrän prosentteissa verraten valmistuotteen massa, olennainen arvo on 60 %, eli 1 kg:n teräsaihoista jää 0,6 kg teräslastuja ja 0,4 kg:n painoinen valmistuote. (GaBi gabi-software data, Process data set: Steel high-alloyed machining, Steel cast part machining) Kirjallisuudesta löytyy myös arvoja 47 %, sekä 74 % (Nyamekye, 2015, pp. 90). Tästä voimme huomata, että poistomateriaalin % -luku vaihtelee aika paljon. Se riippuu kappaleiden geometrisesta muodosta, sekä aihion koosta että muodosta, ja käsittelytavasta. Tässä laskelmassa ei ole huomioitu kappaleiden geometriaa, aihion käsittelytapoja, terien luokkia ja muotoja, koneistuskoneiden tyyppiä tai malleja, koneistuksen aikaa eikä ruostumattoman teräksen laatua. Myöskään laskelmassa ei ole huomioitu koneistuskoneiden tuotantoa, end-of-life:a tai käytettyjä lisäaineita, kuten öljyjä, Tässä laskelmassa ei ole huomioitu sekoittimen kokoonpanossa käytettyä sähkönkulutusta, eikä pintojen käsittelyssä, kuten maalauksessa, osien hitsauksessa käytettyä sähkön kulutusta eikä maalauksessa käytetty maalia ja sen valmistusprosessia.

GWP – potentiaalinen laskenta perustuu kulutetun energian määrään koneistuksen aikana. GaBi-tietokannan mukaan sen voi laskea kaavasta

$$”slope” \cdot ”scrap” \cdot 3,6 = Energia\ määrä\ [MJ / 1\ kg] \quad (12)$$

valmis terästuote, missä ”scrap” on valmistuotteen painoprosentti verraten lastujen määrään. Oletus ”slope” arvioksi korkea-seostetun teräksen koneistukselle on 2,7. (GaBi gabi-software data, Process data set: Steel high-alloyed machining, Steel cast part machining, 2016)

Seuraavaksi lasketaan teräslastun määrä Helmix-sekoittimen tuotantoprosessissa.

Taulukossa 7 bruttopaino on teräsaihion paino, nettopaino tarkoittaa valmiin osan painoa.

Kokonaisten aihoiden paino ennen koneistusta on noin 283 kg, ja koneistuksen jälkeen osien paino on 182 kg. tästä lasketaan ”scrap” painoprosentti:

$$(283 \text{ kg} - 182 \text{ kg}) : 182 \text{ kg} = 0,55$$

Metalli romun painoprosentti koneistuksen jälkeen on noin 55 %.

Taulukko 7. Valmistusaihioiden ja osien paino.

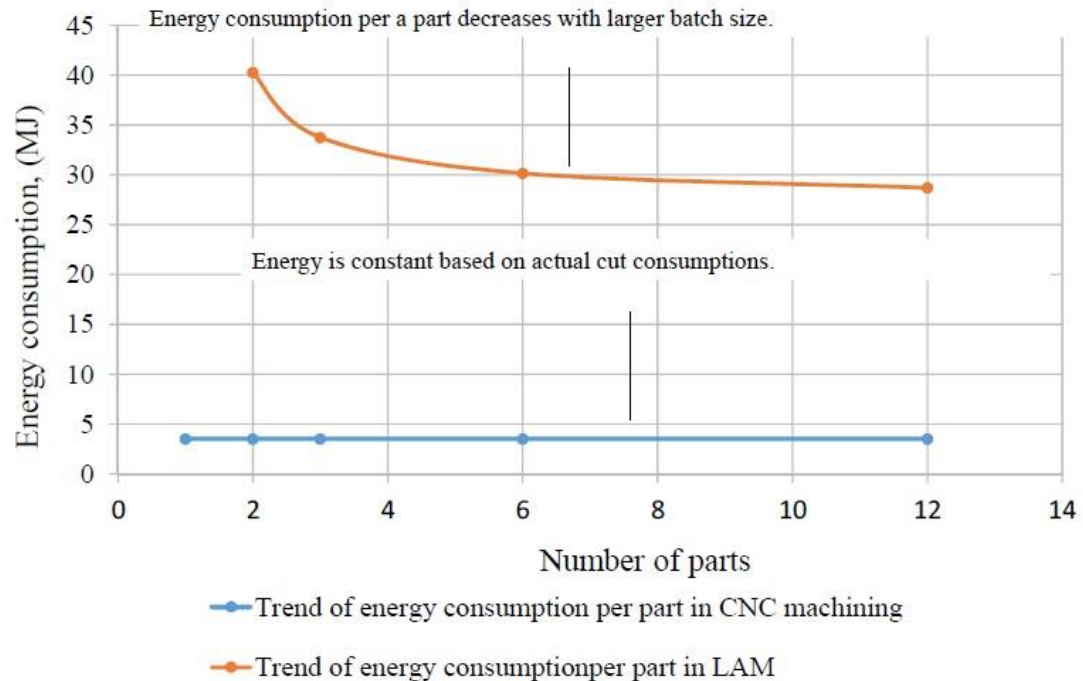
Osa	Brutto paino, kg	Netto paino, kg	kpl.	Netto kok.paino, kg	Brutto kok.paino, kg
Sekoitinrunko					
Tukirengas	4,4	2,9	1	2,9	4,4
Kiinnityslaippa	30,2	12,9	1	12,9	30,2
Laippa + putket	15,7	15	1	15	15,7
Laippa	47,5	22,2	1	22,2	47,5
Runkoputki	39,8	39,3	1	39,3	39,8
Sekoitinakseli	72,5	53,1	1	53,1	72,5
Tiivistepesä	50,4	24,2	1	24,2	50,4
Liukuholkki	1,05	0,3	1	0,3	1,05
Tiivisteiden suojus	0,9	0,87	1	0,87	0,9
Lukituslevy	0,2	0,2	1	0,2	0,2
Potkuri koottuna					
Siiven keskitappi	0,02	0,02	4	0,08	0,08
Napa	20,1	11,3	1	11,3	20,1
Potkurin siipi	5	5	4	20	20
Yht.:				182,35	282,83

Lasketaan koneistukseen käytetty sähköenergian kerroin GaBi kaavan mukaan (12):

$$2,7 \cdot 3,6 \text{ MJ/kg} \cdot 0,55 = 6,2 \text{ MJ/kg}$$

Nyamekyen työssä “Energy and raw material consumption analysis of powder bed fusion. Case study: CNC machining and laser additive manufacturing” 2015, on laskettu CNC (Computerized Numerical Control - tietokoneavusteisen suunnittelun tuloksia on käytetty valmistustekniikan laitteiden numeeriseen ohjaukseen) ja LAM (Laser additive manufacturing) ruostumattomien teräsosien koneistuksessa käytetty energian määrä. Hän oli analysoinut seuraavat prosessit: ulkopuolinen sorvaus, poraus, sisäinen sorvaus, jyrsintä,

leikkaus sekä työkalujen vaihto. Kokeellisen tutkimuksen jälkeen hän sai energiankulutustulokset, mitkä on esitetty kuvassa 44.



Kuva 44. Energian kulutus CNC ja LAM koneistuksessa (Nyamekye, 2015).

Nyamekyen työssä koneistuksen sähkönkulutus on huomattavasti isompi kuin sekoittimen osien koneistuksessa, koska koneistettavan osan geometrian takia lastujen määrä on melkein 3 kertaa enemmän kuin valmiin tuotteen paino, painoprosentti on 294 %. Myös hänen työssä tulee esiin, että todellinen sähkönkulutus CNC-koneistuksessa voi vaihdella noin $\pm 400\%$ - 50 % riippuen koneistettavien kappaleiden geometriasta ja koneistuksessa käytetystä koneista.

GaBi-ohjelman versio ei ota huomioon myöskään koneistustapaa eikä koneistettavan teräksen ominaisuuksia. Tässä tapauksessa on käytetty samoja arvoja kaikille seostetuille teräksille.

Käyttämällä Nyamekyen tutkimuksesta saatuja virhearvoja saadaan näyttöä, että sekoittimen osien koneistuksessa käytetty sähkönkulutus vaihtelee mahdollisesti 4514 MJ – 564 MJ välillä.

Taulukko 8. Sähkönkulutus sekoittimen osien valmistuksessa.

	MJ/kg	kg	MJ
Standardiarvo	6,2	182	1128
+ 400 %	24,8	182	4514
- 50 %	3,1	182	564

6.4.7 Käyttö ja sähkönkulutus käytön aikana

Sekoittimessa Helmix HF-80 käytetään sähkömoottoria SEW ja sen teho on 18,5 kW. Sähkömoottorin sähkönkulutus vapaalla käynnillä ilman kuormitusta on vähempi kuin kuormituksella. Mitä enempi on kuormitusta, sitä enemmän sähköenergiaa moottori kuluttaa. Moottorin sähkönkulutus kasvaa jyrkästi heti käynnistyksen jälkeen, moottorin käynnistämisen jälkeen sähkönkulutus laskee ja tasaantuu, jos kuorma ei muutu. Sekoittimen sähkömoottorin kuormitus riippuu sekoitettavan aineen viskositeetista ja tiheydestä. Täydellä teholla sähkömoottoria ei kuitenkaan koskaan käytetä, joten kuormituksella yleensä käytetään 75 % tehosta. Sekoitin pyörii valkaisu- ja puhdistusvaiheissa 24 tuntia vuorokaudessa. Sen arvioitu käyttö-aika on 10 vuotta, joten sekoitin toimii 87 600 tuntia elinaikanaan.

$$24h * 356d * 10a = 87600h$$

Sekoitin käyttää noin 1 215 450 kWh elinaikanaan.

$$18,5kW * 75\% * 87600h = 1215450 kWh$$

Lasketaan vielä sähkönkulutus MJ:ssa.

$$1 kWh = 3,6 MJ$$

$$1215450 kWh = 4375620 MJ$$

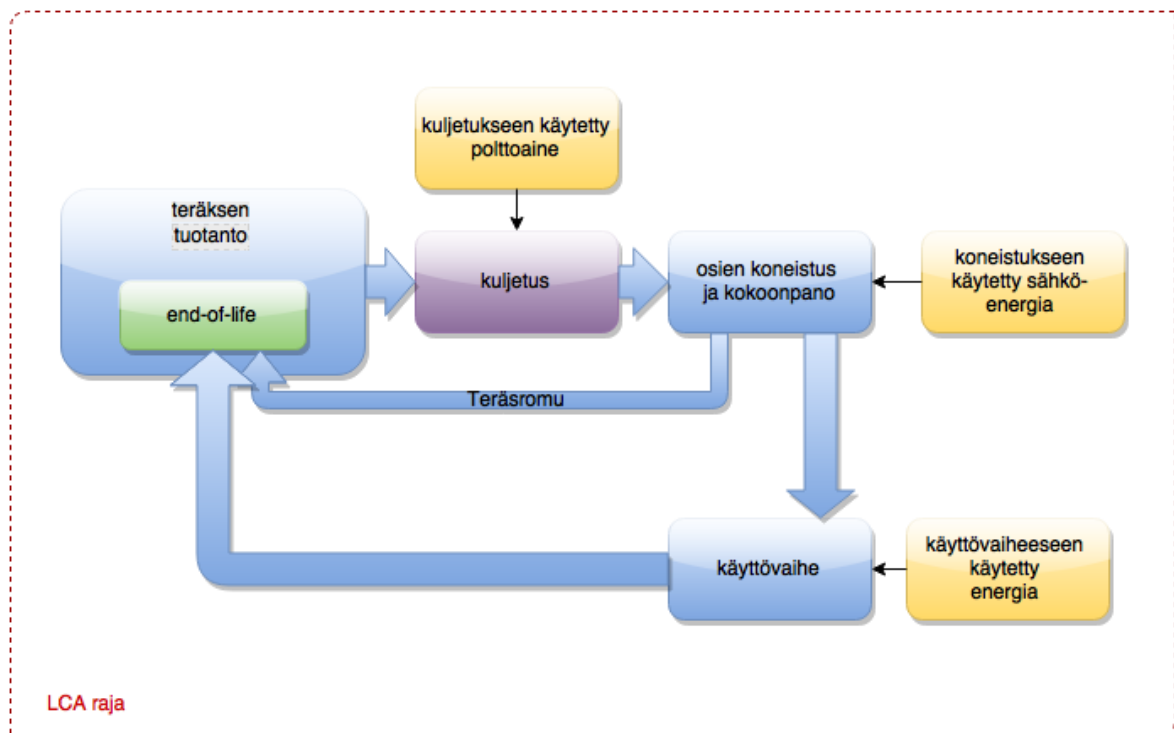
Tuloksena on Helmix-sekoittimen sähkönkulutus elinaikanaan noin 4 376 000 MJ.

6.4.8 End of Life

Prosessin kuvaus: tässä osassa kuvataan end-of-life-prosessi sekoittimelle. Sekoitin periaatteessa koostuu ruostumattomasta teräksestä. Sen takia end-of-life prosessi tehdään ruostumatonta terästä varten. Yleinen oletettu kierrätysaste terästuotteille on 95 %, loppujen 5 % on oletettu päätyvän kaatopaikalle.. Ruostumaton teräs on kuitenkin 100 % kierrätettävä materiaali ja säilyttää korkealaatuiset ominaisuudet kierrätyksen jälkeenkin, minkä takia teräsjätteelle ensisijainen käsittelytapa on kierrätys, kokonaiset 182 kg teräsromua. Kaatopaikkasijoittaminen teräkselle ei ole suositeltua, koska teräs on arvokas resurssi, mutta teräs kaatopaikkajätteenä ei aiheuta lisähaittavaikutuksia ympäristölle (Outokumpu Oyj, 2015, pp. 3-4). Tässä laskelmassa oletetaan että sekoitin menee 100 %-sti kierrätykseen.

End-of-life prosessin analyysiä varten käytetään Gabi-ohjelmatiedostoa ruostumatonta terästä varten. Tiedoston perusteella teräksen tuotanto on Saksassa, mikä ottaa huomioon tärkeimmät tuotannon vaiheet. Tärkein prosessivaihe on romun sulaminen valokaariuunissa (EAF), jolloin kulutettu energia on pääasiassa sähköä. Tärkeimmät raaka-aineet EAF varten on romurauta. Epätoivotut komponentit sulatetusta teräksestä absorboidaan kalkin avulla, mikä muodostaa kuonan. Niinpä prosessin lisäaineena käytetään kalkkia, ja hiiltä käytetään pelkistämiseen. Laskelmassa myös huomioitu happi peitsien (Oxygen lances) ja/tai happi-polttimien käyttö, kun niitä käytetään apuna alkuvaiheessa teräsromun sulattamiseen. Jokaisen materiaalin kuljetus on myös huomioitu laskelmakokonaisuudessa. Laskelmassa on otettu huomioon seuraavat keskeiset toiminnot: raaka-aineiden käsittely ja varastointi, uunin lataus/romun ilmakuumennus, EAF-romun sulatus, teräksen ja kuonan poisto, senkkauunin hoito ja säätö, kuonan käsittely ja jatkuvavaluprosessit. Laskettu tuotantoprosessin lopputuote on teräspalkki (GaBi software data).

Jos verrataan teräksen end-of-life-prosessia teräksen valmistusprosessiin, niin voimme huomata, että end-of-life-prosessissa on huomioitu samat tuotantoprosessin seikat mitkä on laskettu jo terästuotantoprosessissa. Koska teräksen tuotantoprosessilaskelma tavallaan jo sisältää teräsromun käsittelyn, se sisältää kaikkien raaka-aineiden käsittelyn, hankinnan ja kuljetusprosessit. Metalliromu muodostaa 95 % teräksen raaka-aineista, sen takia se on jo tavalla huomioitu LCA-laskelmassa, teräksen tuotantoprosessin sisällä. Lopullinen LCA-vaiheiden kaava on esitetty kuvassa 45.



Kuva 45. LCA-vaiheiden kaava.

6.4.9 LCI tulokset

LCI-tiedonkeruun menettelytavat

LCI-tiedonkeruun menettelytavat: tiedot LCI varten on hankittu Virtor Oy sekoitinpiirustuksista, GaBi-tietokannasta, Outokumpu Oy ympäristöraporteista, P. Nyamekye diplomityöstä, sekä muusta kirjallisuudesta, kuten: Mekaaniset ominaisuudet, 2015, Paroc Group Oy; Metallien mekaaniset ominaisuudet, 2010, Mtomd.info; Database of Steel and Alloy (Marochnik), 2009 – 2015, National Technical University; Valmistus ruostumattomasta teräksestä, 2014, Toreador Stal.

Lähdetiedon laadun arviointi

Työn tavoitteiden toteuttamiseen lähdetietojen laatu on tarpeeksi riittävä. GaBi-tietokanta arvioi oman tiedoston tarkkuudeksi 92 - 95 %, muiden LCI käytettyjen tietolähteiden laatu voidaan arvioida olevan 80 – 95 % välillä, mikä on myös luotettava tarkkuusluokka.

LCI-tulokset

LCI-tulokset on esitetty taulukossa 9. Taulukkoon on myös kerätty GWP-kertoimet, kg CO₂ – Eq / 1 kg. Teräksen valmistukseen liittyvät GWP-kertoimet on otettu Outokummun ympäristöraportista (Outokumpu, 2014a). Kaikki muut GWP-kertoimet on otettu GaBi 6.-tiedostosta.

Polttoaineen GWP-vaikutuksen laskelmassa on käytetty ”Diesel mix at refinery” tietokannan arvoja (500 ppm rikkiä, 5,39 p-% biocomponentit, 2011). Tietokanta kattaa koko toimitusketjun jalostamosta tuotteeseen. Tämä sisältää porauksen, raakaöljyn tuotannon ja jalostuksen, sekä raakaöljyn kuljetuksen putkijohdon kautta. Laskelmassa on käytetty tietoja tärkeimmistä tuotantoprosesseista, sekä perinteisiä että epätavanomaisia (öljyhiekan, in-situ) mukaan luettuna sellaisia parametrejä kuten energiankulutus, kuljetusetäisyys, raakaöljyn jalostusteknologiat. (GaBi software, 2014)

Sähköenergian GWP-vaikutuksen laskelmassa on käytetty Electricity grid mix tietokannan arvoja (2011). Tietokanta kuvaa keskimääräisiä arvoja sähköntuotannosta loppukuluttajalle asti sisältäen itse kulutetun sähkön, sekä siirto- / jakeluhävikin että sähköntuotannon naapurimaista. Tietokanta sisältää erilaisia energiatuotantomuotoja, voimalaitosten tehokkuuden tietoja, hyötysuhdelämmön ja sähkön tuotannosta (CHP), sekä siirto- / jakeluhäviöitä. Arvot on otettu virallisista tilastoista vuodelta 2011. Tietojen keräämiseen oli käytetty tiettyjä voimalaitosmalleja, joissa oli mitattu päästöjen määrä (esimerkiksi NO_x ja raskasmetalli) ja laskettu päästöarvot. (GaBi software, 2014)

Taulukko 9. Helmix-sekoittimen LCI-tulokset ja muut laskelmassa käytetyt parametrit.

Prosessin nimi	Arvon nimi	Arvo	Yksikkö	GWP kerroin, kg CO ₂ - Eq. / 1 kg tai 1 km
Teräksen valmistus:				
kylmävalssattu	teräksen paino	283	kg	3,55
kuumavalssattu	teräksen paino	283	kg	2,75
Teräksen kuljetus:				
Suomesta	matka	701	km	
	lasti	283	kg	

	polttoaineen kulutus	4,6	kg	0,53
Belgiasta	matka	1959	km	
	lasti	283	kg	
	polttoaineen kulutus	12,1	kg	0,53
Teräksen koneistus:	teräksen paino input	283	kg	
	teräksen paino output	182	kg	
	sähkön kulutus standardi	1128	MJ	0,17
	sähkön kulutus, max.	4514	MJ	0,17
	sähkön kulutus, min.	564	MJ	0,17
Käyttöaika:	toiminta aika, 24h/d	10	a	
	sähkön kulutus	4375620	MJ	0,17
End-of-live:	hyötykäyttö %	100	%	
	teräsromun massa	182	kg	0,42

6.5 Vaikutusarviointi

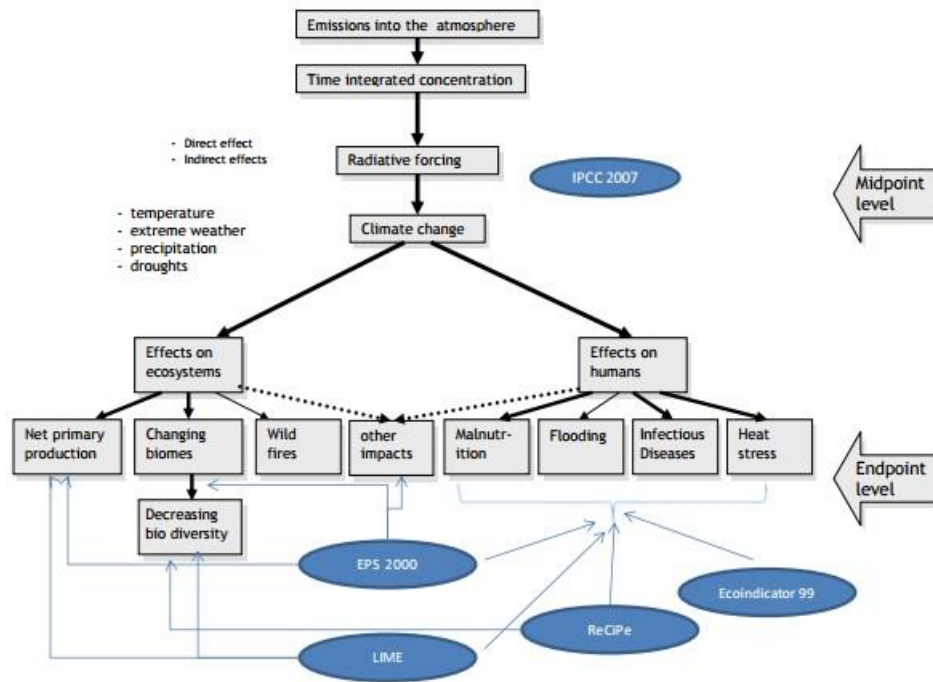
6.5.1 Ilmaston lämpenemisen potentiaali – GWP, taustatietoja.

Työssä selvitettiin tarkasteltavan kokoelinkaaren GWP-vaikutusta. Suurin ympäristövaikutuksista on maapallon ilmaston lämpenemisen potentiaali Global Warming Potential (GWP 100 years). Kaikki LCIA-menetelmät sisältävät ilmastonmuutosarviointiluokan (sitä joskus kutsutaan myös Global Warming), ja kaikissa LCIA-menetelmissä käytetään IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) kehittämiä kasvihuonevaikutusarvoja (GWP-arvot). On kuitenkin olemassa eroja GWP-arvojen käytössä, esimerkiksi ero tekijöiden (kertoimien) välillä voi johtua siitä että IPCC julkaisee säännöllisesti päivityksiä ja LCIA-tekijöillä voivat olla eriaikaiset tietokannat, toinen ero on se että IPCC julkaisee GWP-arvot tarkoitettuna eri aikaväleille. On olemassa laaja yhteisymmärrys IPCC:n GWP-käytöstä vaikutuksien arvioinnin keskiarvojen tasolla. Käyttöä varten on valittu neljä menetelmää, ja niiden perusteella on rakennettu kaikki muut arviointimallit: Ecoindicator 99, EPS2000 (Environmental Priority Strategies), ReCiPe and LIME (Life Cycle Impact Assessment Method based on Endpoint Modeling). GWP-arvot oli julkistettu IPCC:n neljännessä arviointiraportissa (AR4, 2007) ja otettiin käyttöön keskiarvoindikaattorina kaikissa karakterisointimalleissa. IPCC-menetelmällä on kolme versiota, mitkä kuvaavat ympäristövaikutuksia kolmella eri aikavälillä. Vaikutusta on arvioitu kumulatiivisen

kasvihuonekaasu (GHG) päästöjen säteilypakotteen kannalta 20, 100 tai 500 vuoden ajalta. Viiden sadan vuoden perspektiiviä pidetään riittävän pitkänä arvioitaessa suurta osaa vahingollisista aineista, jotka viipyvät pitkän ajan ilmakehässä. Vaikutukset 100 ja 20 vuoden aikavälillä kuvaavat aineiden osittaista vaikutusta. Yleensä käytetään arvoja 100 vuoden vaikutuksesta, koska niitä on käytetty Kioton sopimuksen pohjana.

ReCiPe (Goedkoop, 2009) kuvaa ihmisten terveystaivaikutuksia ja lajin häviämistä. Terveystaivaikutuksen tekijät ovat lämpöstressi, malaria, aliravitsemus, ripuli ja tulvat. Muutos säteilypakotteeseen määritetään IPCC:n GWP:llä, mikä julkistettu neljännessä arviointiraportissa (AR4, 2007). Karakterisointitekijät ihmisten terveyden haittavaikutuksista ilmaistaan DALY (Disability Adjusted Life Years - vammaisuus elinvuosina) yksikössä, ja lajin häviäminen Potential Disappeared Fraction (PDF) yksikössä. Meta-tutkimuksessa on käytetty viittaus biologisesta monimuotoisuudesta. On olemassa kaksi ReCiPe-versiota ja molemmissa on otettu huomioon ihmisten terveyden arviointi (Goedkoop, 2009). Ne eroavat siinä, miten lämpötilakerroin lasketaan, mutta eri lähestymistavat johtavat samaan lopputulokseen.

Alla olevassa kuvassa (Kuva 46) on kuvattu ympäristömekanismit ja kunkin LCIA-menetelmän asema syy-seuraus-ketjussa. (ILCD Handbook: Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context, 2011, pp. 9 - 15)



Kuva 46. Ilmaston lämpeneminen ja LCA-menetelmät. (ILCD Handbook: Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context, 2011. p. 15)

Tässä työssä arvioidaan ilmaston lämpenemisen potentiaali Global Warming Potential (GWP 100 years) CML2001-järjestelmän mukaan käyttäen IPCC:n GWP-tekijöitä ja tulokset myös esitetään ReCiPe-järjestelmän mukaan DALY-yksikössä (H – hierarchist, vastaa 100 vuoden vaikutusaikaväliä). DALY-arvot (Disability-Adjusted Life Years - vammaisuus elinvuosia) ovat peräisin ihmisen terveystilastoista ja kuvaavat elinvuosia sekä kadonneita työelämävuosia että vammaisuuden elinvuosia. Arvot vammaisuuden elinvuosista on raportoitu monenlaisista sairauksista, kuten eri syöpätyypeistä, infektio-taudeista ja ei-tarttuvista taudeista.

$DALY = YLD + YLL$, missä YLL on Years of Life Lost, kadonneet työelämävuodet

ja YLD - Years of Life Disabled, vammaisuuden elinvuodet.

$YLD = w \cdot D$, jossa w on raskaus tekijä 0 (täysterve) ja 1 (kuollut) välillä, ja D on taudin kesto aika.

DALY-arvioinnissa on muutama huomioitava asia. Ensiksi terveystilastojen välillä on suuria eroja, mitkä johtuvat esimerkiksi alueellisista terveyshuollon eroista ja taloudellisista tasoeroista. Toiseksi on aikaväli mistä tilastoarvo on otettu, esimerkiksi vuoden 1990 arvot

poikkeavat vuoden 2010 arvoista. Kolmanneksi voi mainita erot rasiustekijän arvioinnissa erilaiselle sairaudelle (Goedkoop, 2009).

ReCiPe 2008 on suunniteltu yrityksenä yhdenmukaistaa CML 2002- ja Ecoindicator 99-järjestelmiä. Mutta ei ole tehty yhtäkään yritystä arvioida vaikutusluokkia, jotka puuttuvat näistä menetelmistä. Tärkeitä puuttuvia näkökohtia ovat: eroosio, suolapitoisuuden kasvu, melu, valo.

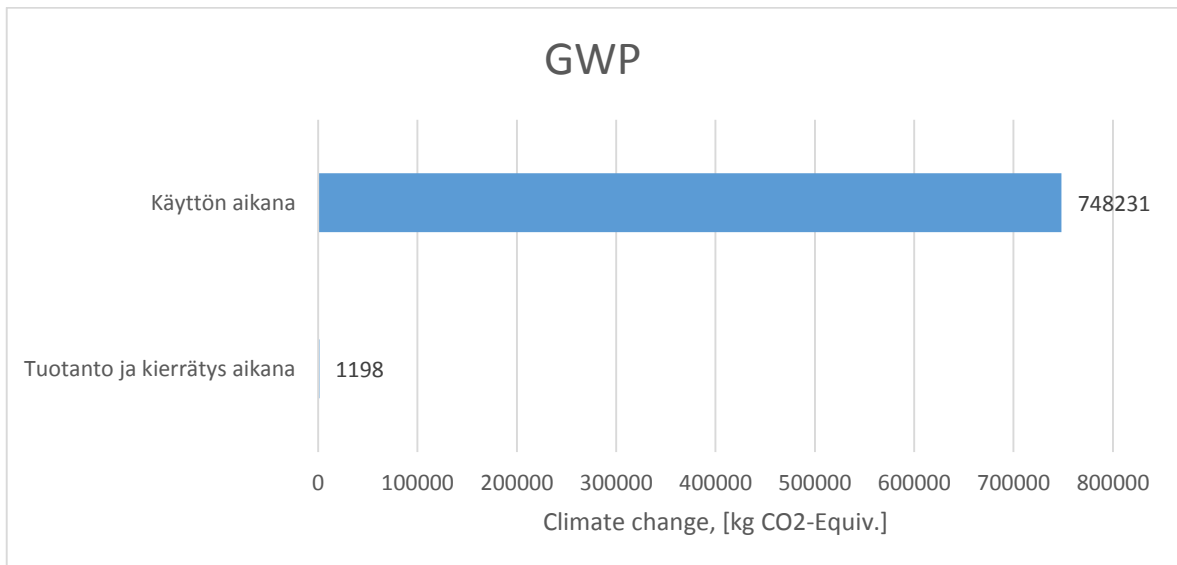
Määrällinen yhteys IPCC:n GWP-yksiköiden (kg CO₂ to air) ja DALY-järjestelmän yksikköjen välissä on esitetty taulukossa 10. Siinä CC tarkoittaa Climate Change (characterization factor global warming potential GWP), HH - damage to human health, ED - damage to ecosystem diversity, I - individualistinen näkökulma vastaa 20 vuoden vaikutusaikaväliä, H - hierarchist, vastaa 100 vuoden vaikutusaikaväliä, ja E – egalitarian, vastaa 500 vuoden vaikutusaikaväliä (Goedkoop, 2009, pp. 9 – 15).

Taulukko 10. Määrällinen yhteys luokkien keskipisteen ja päätepisteen välillä kolmesta näkökulmasta: individualist (I), hierarchist (H), ja egalitarian (E) (Goedkoop, 2009, pp.15).

Midpoint impact category		Endpoint impact category			
Abbr.	Unit	HH (yr)		ED (yr)	
CC	kg (CO ₂ to air - Equiv)	0,00000119	I		
		0,0000014	H	0,00000873	I+H
		0,00000351	E	0,0000188	E

6.5.2 Vaikutusarviointi GWP

Tarkasteltavan Helmix-sekoittimen GWP-vaikutus on laskelman mukaan tuotanto ja kierrätys aikana noin 1209 kg CO₂-Equiv, ja käytön aikana 748 000 kg CO₂-Equiv.(Kuva 47) Mikä yhdessä tekee noin 750 000 kg. CO₂-Equiv.



Kuva 47. GWP sekoittimen tuotanto ja kierrätys aikana sekä sekoittimen käytön aikana.

Analyysissä on huomioitu tärkeimmät vaiheet sekoittimen elinkaaren aikana: raakateräksen valmistus, teräksen kuljetus, teräsosien koneistus ja kokoonpano, koneistuksen aikana käytetty sähkö on myös analysoitu sekä koneistuksen jälkeen jäänyt teräsjetteen ”end of life” että itse sekoittimen ”end of life” prosessi. ”End of life” prosessi tarkoittaa teräsjetteen hyötykäyttöä ja se on huomioitu teräksen valmistusprosessilaskelmassa, minkä takia sitä ei lisätty lopputulokseen erillisenä lukuna.

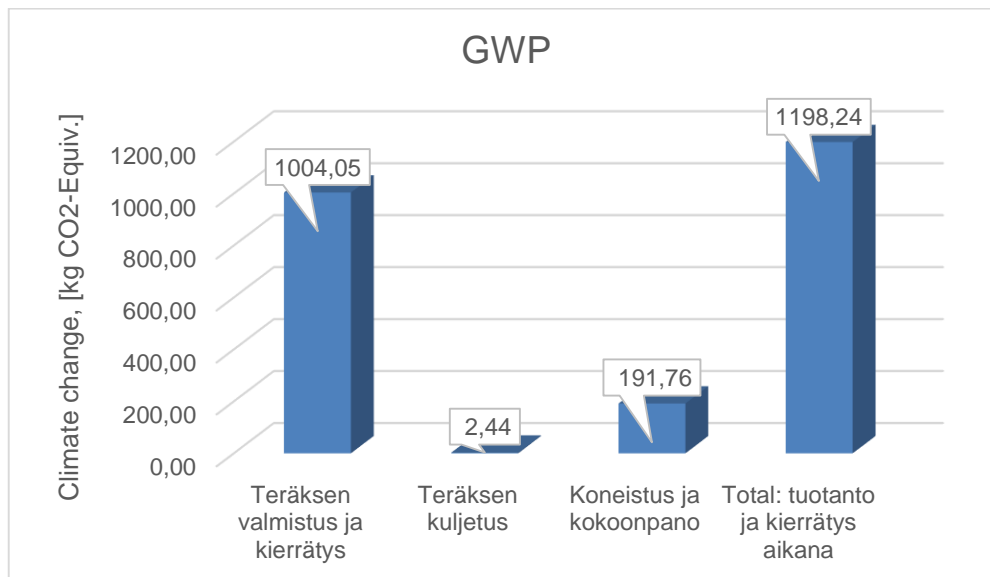
Verrataan GWP:tä sekoittimen tuotanto ja kierrätys aikana ja sekoittimen käytön aikana. Niin käytön aikana GWP on noin 600 kerta suurempi kuin tuotanto ja kierrätys aikana yhdessä. (Kuva 47).

Taulukossa 11 on esitetty GWP arvo Helmix-sekoittimen käytön ajasta. Suurin osa sekoittimen käytönaikaisesta vaikutuksesta perustuu sähkönkulutukseen käytön aikana, ja tässä työssä se on laskettu käyttäen GaBi software database tekijöitä ”sekasähköä” varten.

Taulukko 11. GWP, Climate change, [kg CO2-Equiv.], Helmix-sekoittimen käytön aikana.

	Kerroin, kg CO2-Equiv.	Määrä	kg CO2-Equiv.
Sähkönkulutus	0,17	4375620 MJ	748231
Total			748231

Kuvasta 48, missä on esitetty GWP sekoittimen tuotanto ja kierrätyksen aikana näkyy, että näistä prosesseista suurin vaikutus on teräksen valmistuksessa ja toiseksi suuri vaikutus on osien valmistus (koneistus) prosessissa, mutta teräksen kuljetuksesta ei ole paljon vaikutusta.



Kuva 48. Sekoittimen tuotanto- ja kierrätyskaudesta (teräksen valmistuspylväs sisältä myös kierrätysarvot, teräs valmistetaan 95 % metalliromusta) GWP, Climate change. [kg CO2-Equiv], graafisessa muodossa keskipistemennetelmällä. (Kombinaatio ryhmä ”Keskiarvo”)

LCI tuloksista tulee esiin (Taulukko 9, osa 6.4.9), että eri elinkaaren vaiheena GWP tulokset voivat vaihteella riippuen:

- käytetystä tuotanto materiaalista, onko kysymyksessä ollut kylmävalssattu tai kuumavalssattu ruostumaton teräs
- teräksen kuljetus matkasta, Suomesta tai Belgiasta teräs on tuotu;
- todellinen sähkönkulutus koneistuksen aikana voi vaihdella myös huomattavasti riippuen koneistettavien kappaleiden geometriasta ja koneistuksessa käytetystä koneista.

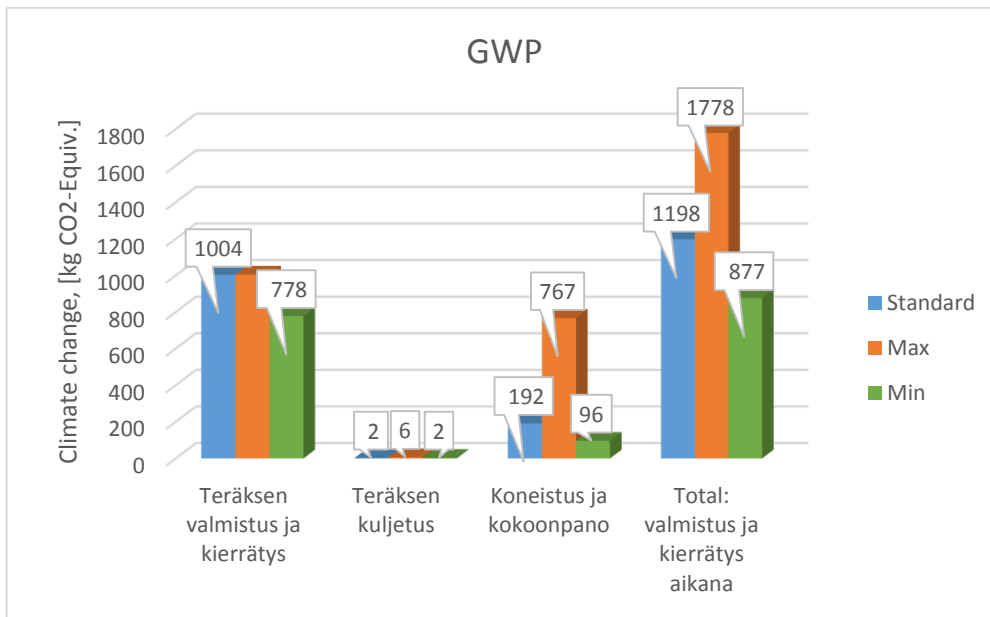
Mahdollinen kombinaatioiden määrä LCI satuille arvoille on 12, esimerkiksi yksi niistä on sekoitin mikä on valmistettu Suomessa valmistetusta kylmävalssatusta terästä, ja sen koneistuksen ja kokoonpanon käytetty minimaalinen energian määrä. Sen takia analyysin varten arvot olivat kombinoitu vain kolmeen eri ryhmään: maksimi, minimi ja keskiarvo. Jakelun tarkoitus oli saada käsitys mahdollisesta LCA arvojen hajottamisesta. Keskiarvo ryhmä oli luotu yleisesti käytettyyn tapauksiin, esimerkiksi Virtor Oy useampi käytä Helmix sekoittimen valmistukseen Outokumpu Oy, Suomessa valmistama kylmävalssattu terästä ja laskelmassa käytetty koneistuksen sähkönkulutus arvo mikä on laskettu GaBi-ohjelman versio kaavan mukaisesti (”Standardiarvo”, Taulukko 8, osa 6.4.9). Sekoittimen osien

koneistuksessa käytetty sähkönkulutuksen maksimi ja minimi rajaat lasketaan vastaavasti maksimi ja minimi ryhmissä. Tilannetta kuvaa taulukko 12.

Taulukko 12. Maksimaalisen, minimaalisen ja keskiarvo laskenta ryhmät.

Prosessin nimi	Maksimaalinen	Minimaalinen	Keskiarvo
Teräksen valmistus:			
kylmävalssattu	+		+
kuumavalssattu		+	
Teräksen kuljetus:			
Suomesta		+	+
Belgiasta	+		
Teräksen koneistus:			
Maksimaalinen sähkönkulutus arvo	+		
Minimaalinen sähkönkulutus arvo		+	
Standardi sähkön kulutus arvo			+

Maksimaali-, minimaali- ja keskiarvo ryhmien GWP arvot laskettu summana elinkaari-prosessien eri arvoista. (Taulukot 13, 14 ja 15) ja esitetty graafisesti kuvassa 49. Kuva 48, s. 75 esittää arvot keskiarvo ryhmästä.



Kuva 49. Sekoittimen tuotanto- ja kierrätyskausista (teräksen valmistuspylväs sisältä myös kierrätysarvot, teräs valmistetaan 95 % metalliromusta). GWP, Climate change, [kg CO₂-Equiv], graafisessa muodossa, maksimaalinen, minimaalinen ja keskiarvo ryhmien arvot.

Analysoitaessa kuvaa 49 huomataan myös että koneistus- ja kokoonpanovaiheella voi olla melkein yhtä suuri vaikutus kuin materiaalin valmistus vaiheella, esimerkiksi tapauksessa missä sekoitin valmistetaan kylmävalssatusta terästä (arvo 778 kg CO₂-Equiv) ja koneistuksen ja kokonpanon energian kulutus on maksimaalinen (arvo 767 kg CO₂-Equiv).

Taulukko 13. Maksimi ryhmän GWP, kg CO₂-Equiv yksikössä.

	Kerroin, kg CO ₂ -Equiv.	Määrä	Yksikkö	kg CO ₂ -Equiv.
Teräksen valmistus	3,55	283	kg	1005
Teräksen kuljetus (kulutettu polttoaine)	0,53	12	kg	6
Koneistus ja kokoonpano (sähkönkulutus)	0,18	4514	MJ	806
Total				1817

Taulukko 14. Mini ryhmän GWP, kg CO₂-Equiv yksikössä.

	Kerroin, kg CO ₂ -Equiv.	Määrä	Yksikkö	kg CO ₂ -Equiv.
Teräksen valmistus	2,75	283	kg	778
Teräksen kuljetus (kulutettu polttoaine)	0,53	4,6	kg	2

Koneistus ja kokoonpano (sähkönkulutus)	0,18	564	MJ	101
			Total	881

Taulukko 15. Keskiarvo ryhmän GWP, kg CO2-Equiv yksikössä.

	Kerroin, kg CO2- Equiv.	Määrä	Yksikkö	kg CO2- Equiv.
Teräksen valmistus	3,55	283,00	kg	1005
Teräksen kuljetus (kulutettu polttoaine)	0,53	4,6	kg	2
Koneistus ja kokoonpano (sähkönkulutus)	0,18	1128	MJ	201
			Total	1209

Jos verrataan keskenään maksimaalisen ja minimaalisen arvoja, huomataan että lopputuloksen arvon eron suurin vaikutus on kuitenkin koneistusprosessissa. Laskennallisesti se on 74 % koko lopputuloksen eron vaikutuksista, silloin kuin teräksen valmistuksessa erovaikutus on vain 25 % koko lopputuloksen vaikutuksen erosta. Erot maksimaalisen ja minimaalisen vaikutusarvojen välissä ovat esitetty taulukossa 16.

Taulukko 16. Erot maksimaalisen ja minimaalisen vaikutusarvojen välissä, %-ssa.

Prosessin nimi	Erot Max ja Min arvojen välissä	
	kg CO2-Equiv.	%
Teräksen valmistus	226	25
Teräksen kuljetus	4	0
Koneistus ja kokoonpano	672	74
Yhteensä	902	100

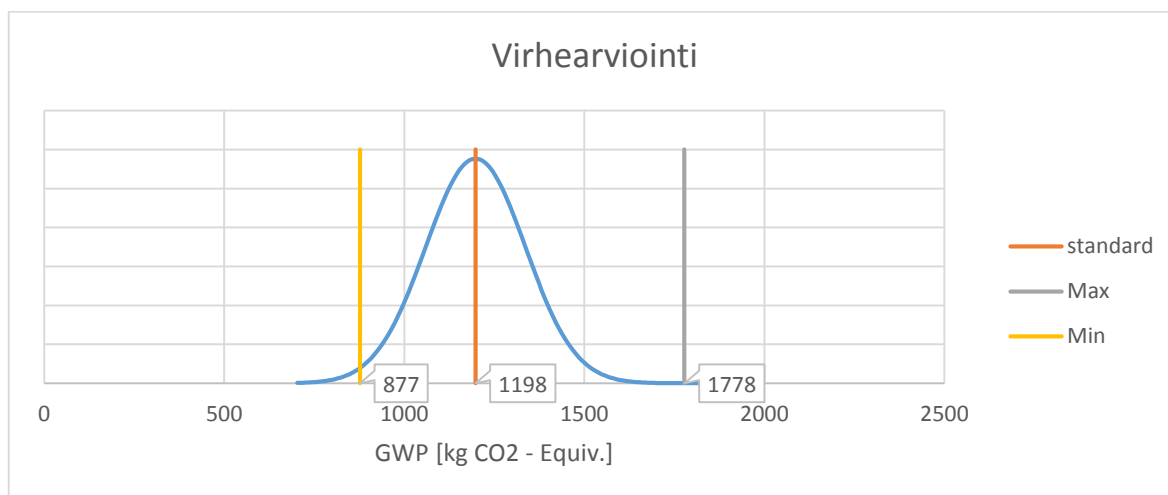
Tarkasteltavan sekoittimen GWP-vaikutus DALY-yksikössä on esitetty taulukossa 17, kertoimet ovat otettu taulukosta 10 (Osa 6.5.1). Kokoelinkaaren aikana sekoittimen GWP-vaikutus on vain 0,002 HH (yr) (kadonneet työelämävuodet + vammaisuuden elinvuodet), eli noin 3 tuntia ja käytön aikana sen arvo nousee kokonaiseen vuoteen.

Taulukko 17. Sekoittimen GWP-vaikutus DALY-yksikössä

	kg CO ₂ -Equiv.	Kerroin	HH (yr)
Elinkaaren aikana	1198	1,40E-06	0,002
Käytön aikana	748231	1,40E-06	1,048

6.6 Tulosten tulkinta ja herkkyysanalyysi

Lähdetietojen laatu oli arvioitu 80 – 95 % välille. GaBi-ohjelma arvioi oman tiedoston tarkkuudeksi 92 - 95 %, muiden käytettyjen -LCI tietolähteiden laatu voidaan arvioida välille 80 – 95 %. Suurin mahdollinen virhe on siten 20 %. Tavallisesti statististen tietojen virheet arvioidaan normaalijakauman avulla. Kuvassa 50 on piirretty Gaussin kellokäyrä tutkittavan sekoittimen LCA-standardiarvosta, (luottamusväli - 0,2; keskiarvo $X = 1198$; keskihajonta $\sigma = 138$; $n_{arv} = 60$). Pystyviivoina on merkitty seuraavat arvot: saatu maksimaalinen LCA-arvo, minimaalinen sekä keskipisteperiaatteella laskettu standardiarvo. Molemmat arvot, sekä maksimaalinen että minimaalinen, ovat mahdollisia, jos luottamusväli kasvaa lähes 100 %.

**Kuva 50.** Virhearviointi normaalijakauman avulla.

Toisaalta, ajattelen saatujen arvojen merkitystä, on todettava että normaalijakauman avulla on mahdollista pelkästään arvioida mahdollisuus tapahtuvasta poikkeuksesta laskettavissa prosesseissa.

Seuraavaksi tarkastellaan tulosten herkkyyttä työssä tehtyjen käytettyjen arvojen suhteen. LCI-vaiheessa määriteltiin seuraavat lähtöarvot (syöttöarvot): teräksen paino – 283 kg, kuljetusmatka – 701 km tai 1959 km ja polttoaineen kulutus, teräksen paino koneistuksen jälkeen – 182 kg, sähkönkulutus koneistuksen ja kokoonpanon aikana 4515 MJ, 564 MJ tai 1128 MJ, käyttöaika – 10 vuotta, sähkönkulutus käyttöaikana noin 4 376 000 MJ, end-of-life-vaiheessa hyötyaste 100 %, teräsromun massa sekoittimesta 182 kg ja 101 kg koneistuksen teräsjäte. Tarkastelemalla joka kohtaa erikseen saadaan yleinen näkemys mahdollisista LCA-virheistä:

käytetty materiaali ja sen paino – yleinen virhe tässä on mittausvirhe, huom. vaa’an tarkkuus, tässä kysymyksessä on teollisuusvaaka ja sen absoluuttinen mittausvirhe on $\Delta \pm 0,01$ kg, punnittujen osien määrä on 19 kpl, virheen kasautumisen sääntöjen mukaan lasketaan kokonaisvirhe seuraavasti: $19 \text{ kpl} \cdot 0,01 \text{ kg} = \Delta \pm 0,19 \text{ kg}$, mikä ei kuitenkaan ole merkittävä määrä LCA:n näkökulmasta. Suuremman virheen voi aiheuttaa teknisen piirustuksen aihion geometria-arvo ja koneistuksessa todellisuudessa käytetyn aihioden koko ja muoto. Laskelmassa on käytetty teknisestä piirustuksesta otettuja arvoja, mutta ne voivat poiketa todellisuudessa konepajassa käytetyistä ahiosta. Tämän virheen suuruus on vaikeasti arvioitava. Tässä ei ole myöskään huomioitu kiinnityselementtien kuten ruuvien, mutterien, kiilojen ja aluslaattojen painoa. Materiaalin valinnasta voi huomata myös sen, että on käytetty arvoja, mitkä on laskettu keskipisteen periaatteella kaikille kylmävalssatuille tai kuumavalssatuille teräslajeille, mutta todellisuudessa tekijät voivat poiketa toisistaan eri teräslajeja varten, esimerkiksi riippuen siitä miten teräs on seostettu.

kuljetus matka ja polttoaineen kulutus – välimatka oli arvioitu matkan lähtö- ja loppupisteen välillä online-reittioppaan avulla, mikä antaa matkan pituuden 0,1 km tarkkuudella, eli virhearvio matkalle on $\Delta \pm 0,1$ km, polttoaineen kulutusarvo on otettu GaBi-tietokannasta, se on laskettu keskipisteperiaatteella, jonka tekijät ovat arvioineet sen tarkkuuden 92 %:n tasolle. Molemmat virheet eivät ole merkittäviä LCA-tuloksien suuruusluokan kannalta. Vaikka matkan pituus tai polttoaineen kulutus kasvaisi kaksikertaiseksi, se ei vaikuttaisi mitenkään merkittävästi LCA-lopputulokseen.

teräksen paino koneistuksen jälkeen – arvioitu teknisten piirustusten geometrian ja ruostumattoman teräksen tiheysarvon tuloksena, arvioitu Solid Edge -ohjelmalla,

tarkkuusluokka $\Delta \pm 0,01$, kokonaisvirhe $\Delta \pm 0,19$ kg. Virheellä ei ole huomattavaa merkitystä LCA-lopputuloksen kannalta.

sähkön kulutus koneistuksen ja kokoonpanon aikana – tämä arvo voi olla hyvin vaihteleva ja riippuu koneistettavan kappaleen geometriasta, kappaleiden lukumäärästä, koneistustavasta ja käytössä olevista koneista. Standardiarvo on laskettu keskipiste-periaatteella ja on oletettu, että se on suoraan verrannollinen koneistusjätteen määrään. Standardiarvon kerroin on otettu GaBi-tietokannasta, jonka tekijät ovat arvioineet sen tarkkuuden tasolle 92 - 95 %. Kirjallisuudesta saadut arvot poikkeavat standardiarvoista + 400 % - (-50 %). Tällä arvolla on hyvin paljon merkitystä LCA-lopputuloksen kannalta. Sen takia LCA on laskettu kolmelle eri arvolle. Analyysin tarkkuutta voi parantaa tekemällä kokeelliset sähkönkulutusmittaukset sekoittimen valmistuksen aikana. Myöskään laskelmassa ei ole huomioitu hitsaukseen käytettyä sähköä, mutta hitsauksen osuus ei ole merkittävä.

käyttöaika ja sähkön kulutus käyttöaikana – arvo on otettu valmistajan arvioimasta käyttöajasta, mutta todellisuudessa se voi poiketa tästä arvosta riippuen käyttöolosuhteista. Usein rikkimenevä osa vaihdetaan, ja sekoittimen käyttö jatkuu. Usein rikkimenevä osa on laakeri tai sähkömoottori. Taas raskaissa käyttöolosuhteissa sekoittimen käyttöaika voi olla lyhempi. Toinen vaikuttava seikka on se, että käyttöaika on laskettu 100 % kuormalla koko käyttöaikana, eli ei ole huomioitu seisokki- ja/tai huoltoaikoja ollenkaan. Sekoittimen kuorma myös vaikuttaa sähkönkulutukseen, samoin esimerkiksi sekoitettavan aineen viskositeetti ja tiheys sekä kiintoaineen pitoisuus. Sähkönkulutukseen voi vaikuttaa myös sähkömoottorin käynnistys- ja pysähdyskertojen määrä, sillä käynnistyksessä sähkömoottori käyttää enemmän energiaa kuin tasakäynnillä.

7. GWP-VAIKUTUKSEN PIENENTÄMISEN MAHDOLLISUUDET.

Sekoittimen LCA-analyysistä tulee esiin miten sekoittimen koko elinkaaren aikana se vaikuttaa maapallon ilmastolämpenemiseen. Ensisijaisesti vaikuttaa sekoittimen käytön aikana kulutettu energiamäärä ja sen alkuperä. Toiseksi vaikuttavat valmistamiseen käytetty

materiaalin määrä sekä mahdollisesti materiaalin valinta. Seuraavaksi vaikuttaa sähkönkulutus koneistuksen aikana. Kuljetuksen osuus GWP-vaikutuksessa on hyvin pieni.

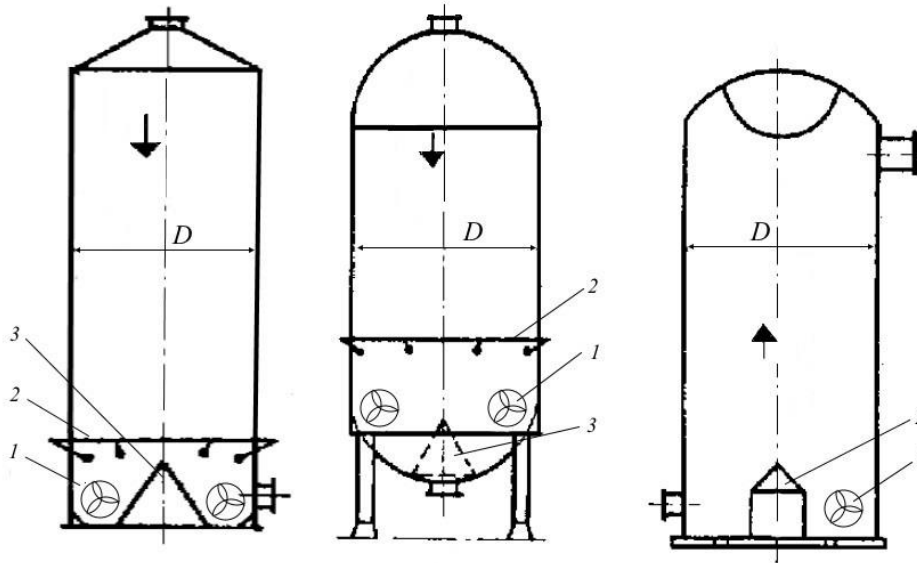
7.1 Sekoittimen optimointi sähköenergian kuluttamisen näkökulmasta.

Käytön aikana kulutettuun energiamäärään vaikuttavat: sekoitusaika, sekoittimessa käytetty sähkömoottorin teho sekä sekoittimen kuormitus ja seisokkien määrä. Erityyppisten neste- ja kolloidisekoittimien konstruktivista rakennetta analysoitaessa (Osat 2 ja 3) on huomattu, että koneen perusosalla on samanlainen rakenne jokaisessa sekoittimen tyypissä. Laitteen pääkomponentit ovat: sähkömoottori ja ohjausjärjestelmä, vaihde, akseli ja potkuri.

Useimmalla valmistajalla on paljon käytännön kokemusta toimilaitteiden suunnittelussa ja valmistuksessa, ja vuosikymmenien aikana ne ovat pystyneet nostamaan tuotteet tasolle, joka mahdollistaa sekoittimen häiriöttömän ja tehokkaan toiminnan muutamien kymmenien tuhansien tuntien aikana. Siksi voimme olettaa, että mahdollisuudet parantaa yksittäisten sekoittimen klassista muotoilua on jo käytetty lähes kokonaisuudessaan.

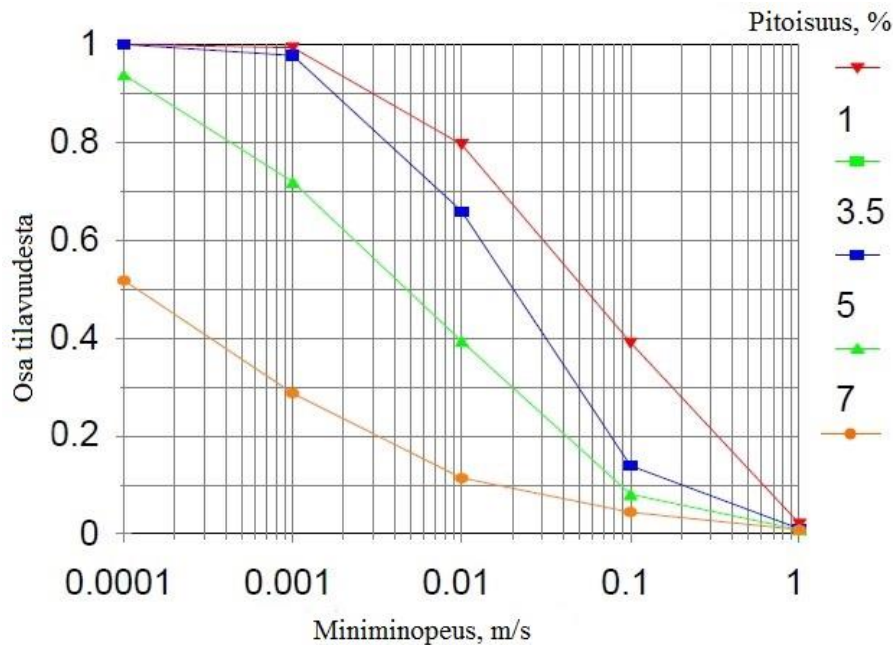
Poikkeuksetta kaikki valmistajien tarjoukset on tehty alustavaan tutkimukseen pohjautuen koskien asiakkaan haluamaa tuotantoprosessia, johon sekoitin tarvitaan. Tämä toiminta vahvistaa ajatuksen, että ei ole universaalia laitetta ja sekoittimen optimointi on pohjimmiltaan moottorin, vaihteiston ja potkurin yhdistelmän huolellinen valinta, joka antaa maksimaalisen tehokkuuden ja kannattavuuden annetulle prosessin alkuparametreille. Kuitenkin, aikaisemmin valittu yhdistelmä ei ole optimaalinen ratkaisu, jos prosessin parametrit, kuten aineen tiheys, muuttuvat, tai on tarvetta lisätä sekoituksen voimakkuutta (intensiivisyyttä). Tällä hetkellä tämä ongelma ratkaistaan korvaamalla moottori tai potkuri.

Sekoitusprosessien analyysi ja erityisesti sekoitettavan massan valkaisu sellutornissa osoitti, että harvoin on tarjolla taloudellista ja tehokasta menetelmää, jossa käytetään vain yhtä sekoitinta. Yleensä on kaksi tai useampi sekoitin (joissakin tapauksissa käytetään sekoittimia erilaisilla ominaisuuksilla), jotka sijaitsevat tornin alaosassa. Korkeiden nopeusvirtauksien vuorovaikutus muun tornin massan kanssa vaikuttavat aineen sekoittamiseen koko tornin läpi. Esimerkkejä sellaisista ratkaisuista on esitetty esimerkiksi oppikirjassa ”Selluloosan valkaisu”, Milovidova, 2005 (Kuva 51).



Kuva 51. 1 - sekoitin; 2 - laimennuslaite; 3 – virtausmuodostuskartio. Valkaisutornin rakennekaavio. (Milovidova, 2005)

Kokeelliset tutkimukset ja matemaattinen mallintaminen sekoitusprosesseista, mitkä on esittänyt A. Bakker teoksessaan ”The Flow Pattern in an Industrial Paper Pulp Chest with a Side Entering Impeller”, ovat osoittaneet, että tällaiset rakenteelliset ratkaisut, jopa ison alkuperäisen virtauksen nopeudella (1,0 m/s), aiheuttavat sekoittamisen keskinopeudella useimmissa aineissa maksimissa 0,001 - 0,01 m/s. Nopeuden leviäminen sekoitettavaan aineeseen on esitetty kuvassa 52.



Kuva 52. Nopeuden leviäminen sekoitettavaan aineeseen (A. Bakker)

Alhainen sekoittamisen nopeus vaatii lisää sekoittamisen aikaa, ja massan tiheyden kasvattaminen (mikä nostaa prosessin tuottavuutta) – vastaavasti vaatii lisää moottorin tehoa. Kaikesta yllämainitusta seuraa, että on tarve löytää sellainen konstruktiivinen ratkaisu, mikä merkittävästi parantaisi vuorovaikutusta korkean energian omaavien virtauksien ja muun tornissa olevan massan välillä.

Sekoitusteho ja energiankäyttö riippuvat hyvin paljon siitä, kuinka hyvin sekoitin on optimoitu. Optimointi voidaan tehdä esimerkiksi mallintamalla sekoitettavan nesteen virtaukset, ottamalla huomioon sekoitussäiliön koko ja muoto, sekoittimen lapojen (potkurin) muodot ja koko, lapojen pinta-ala ja luku sekä sekoittimen (potkurin) etäisyys säiliön seinistä, säiliöön sisäänrakennettuja virtausta ohjaavia laitteita (ohjauslevyt, heijastuslevyt, diffuusorit).

Tämän työn luvussa 2.8.3 on todettu, että potkurisekoittimen tuottavuus riippuu nesteen ominaisuudesta ja potkurin koosta ja muodosta. Sekoitettavaan nesteen ominaisuuksiin ei usein voi vaikuttaa teknologisen prosessin vaatimuksien takia, mutta potkurin koko ja muoto ovat tässä tapauksessa muuttuvia parametrejä, mikä tarkoittaa että energiankulutuksen parantamisen suhteen sekoittimen käyttöaikana kannattaa kiinnittää huomiota sekoittimen

potkurin muodon kehittämiseen, sekä tutkimiseen sekoitus aineen virtauksien, mikä syntyvät kehitetyn potkurin mallin toiminnan tuloksena.

Myös on hyvä käyttää kokeellisesti saatua optimaalista suhdearvoa sekoittimen säiliön halkaisijan ja sekoittimen halkaisijan suhteen sekä pyörimisnopeuden suhteen. (Gelperin, 1981, p.189) Esimerkki optimaalisista suhdearvoista on esitetty tässä työssä taulukossa 1.

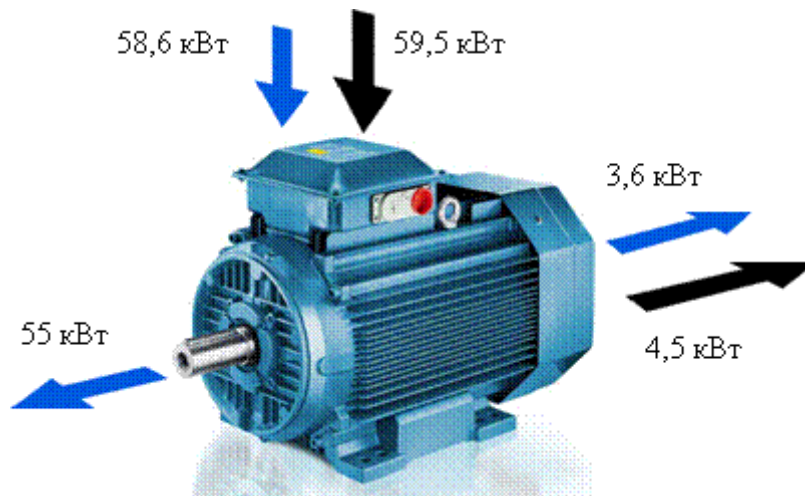
Optimoimalla sekoitusvirtaukset saadaan tehokkaammin tapahtuva sekoitusprosessi, mikä vähentää sekoitusaikaa ja myös energiakulutusta sekoitusprosessissa. Myös taajuusmuuntajan käyttö on hyvä ratkaisu, koska sillä voidaan säätää nopeutta/tehonottoa tarpeen mukaan, mikä säästää sekoittimen käytön aikana kulutettua sähköenergiaa. (Lahti, 2015)

Toinen asia, mikä vaikuttaa sekoittimen energiasäästämiseen on energiatehokkaan sähkömoottorin käyttö. Keinoja parantaa moottorin energiatehokkuutta ovat:

1. käyttää sähköteknisiä teräslajeja, sillä niillä on parannettuja magneettisia ominaisuuksia ja vähennetty magneettista häviötä;
2. käyttää lisäprosessivaiheita (esimerkiksi hehkutus parantaa teräksen magneettisia ominaisuuksia, mitkä usein huononevat koneistuksen jälkeen);
3. käyttää eristystä, millä on korkea lämmönjohtavuus ja eristelujuus;
4. parantaa aerodynamiikkaa, mikä vähentää ilmanvaihdon häviötä;
5. käyttää laadukkaita laakereita (NSK, SKF);
6. kasvattaa työstötarkkuutta komponenttien ja moottorin osien valmistuksessa;
7. käyttää taajuusmuuntajaa moottorin yhteydessä.

Viisi viimeistä kohtaa sopivat myös koko sekoittimen (ei pelkästään sähkömoottorin) rakenteelliseen muutokseen, mikä voisi vähentää sekoittimen energiakäyttöä ja GWP-vaikutusta.

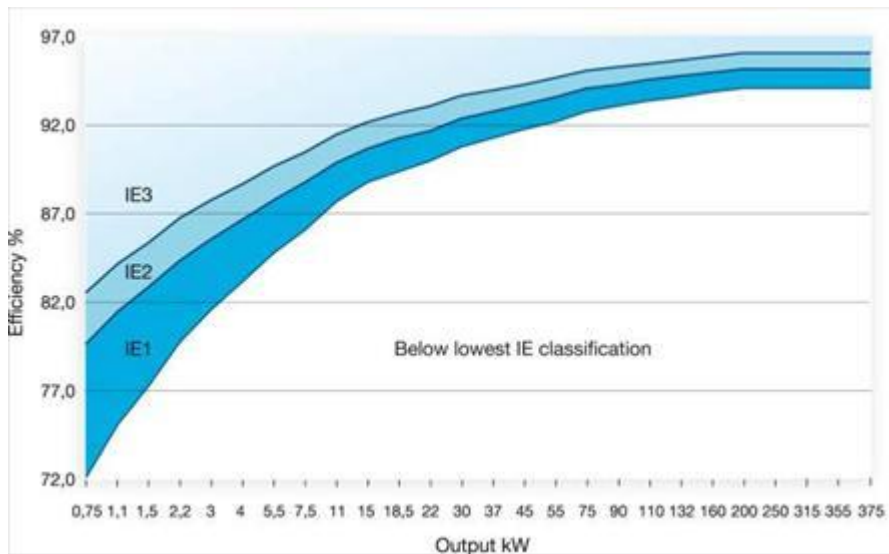
Ensimmäinen parametri, mikä kuvaa sähkömoottorin energiatehokkuutta, on moottorin hyötysuhde η . Toinen tärkeä parametri, mikä kuvaa sähkömoottorin energiatehokkuutta, on kuormitusaste $\cos\varphi$. Järjestelmää, missä on moottorin korkea hyötysuhde, mutta alhainen $\cos\varphi$ arvo, ei voi laskea energiatehokkaaksi (Szemo, 2015).



Kuva 53. Vertailu tavallisen (mustat nuolit) sähkömoottorin energiatehokkuuteen (siniset nuolit). (Szemo, 2015)

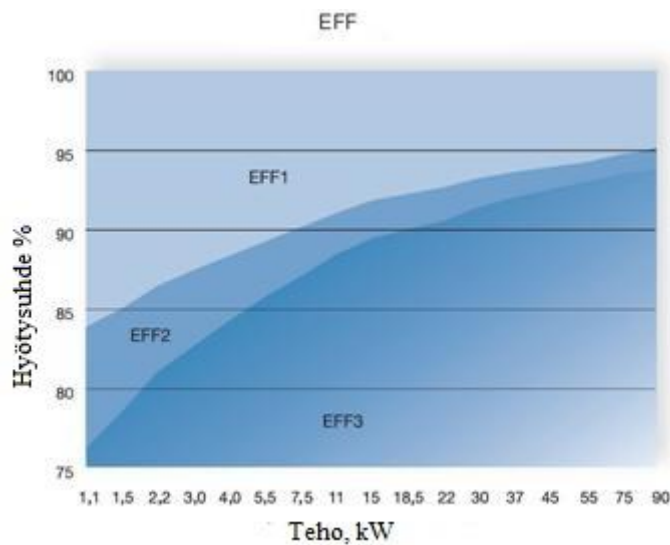
Nykyaikana energiatehokkaat moottorit eivät ole saaneet kuitenkaan laajaa käyttöä. Syynä on alhainen käyttäjien tietotaso ja korkea hinta. Hinnan analyysi kuitenkin antaa seuraavat tulokset: kustannusero sähkömoottorien energiatehokkuusluokkaan IE1 ja – sähkömoottori IE2 käytössä maksaa itsensä takaisin noin yhdessä vuodessa. Siinä mielessä on tärkeää informoida asiakasta energiatehokkuudesta eli moottoreiden mahdollisuudesta säästää kustannuksia käyttövuosien aikana. Siinä mielessä on hyvä huomioida myös se, että eristyksen kesto aika puolittuu, jos lämpötila nousee 100°C. Sen takia energiatehokkaan moottorin käyttöaika kasvaa, koska sen lämpötila laskee.

Uudet kansainväliset normit, mitkä säättävät sähkömoottoreiden energiatehokkuutta: vuosina 2007 ja 2008 IEC oli asettanut kaksi uutta normia koskien sähkömoottoreiden energiatehokkuutta: standardi IEC/EN 60034-2-1 määrittää uudet hyötysuhdenormit ja uudet standardi IEC 60034-30-luokat sähkömoottorien energiatehokkuudelle. Standardissa IEC 60034-30 on määritetty kolme energiatehokkuusluokkaa kolmivaiheisille asynkronisille moottoreille (Kuva 54). (Szemo, 2015)



Kuva 54. Energiatohokkuusluokka standardi IEC 60034-30 mukaisesti. (Szemo, 2015)

Nykyaikana energiatohokkuuden luokat voidaan nähdä seuraavassa muodossa: EFF3, EFF2, EFF1 (Kuva 55).



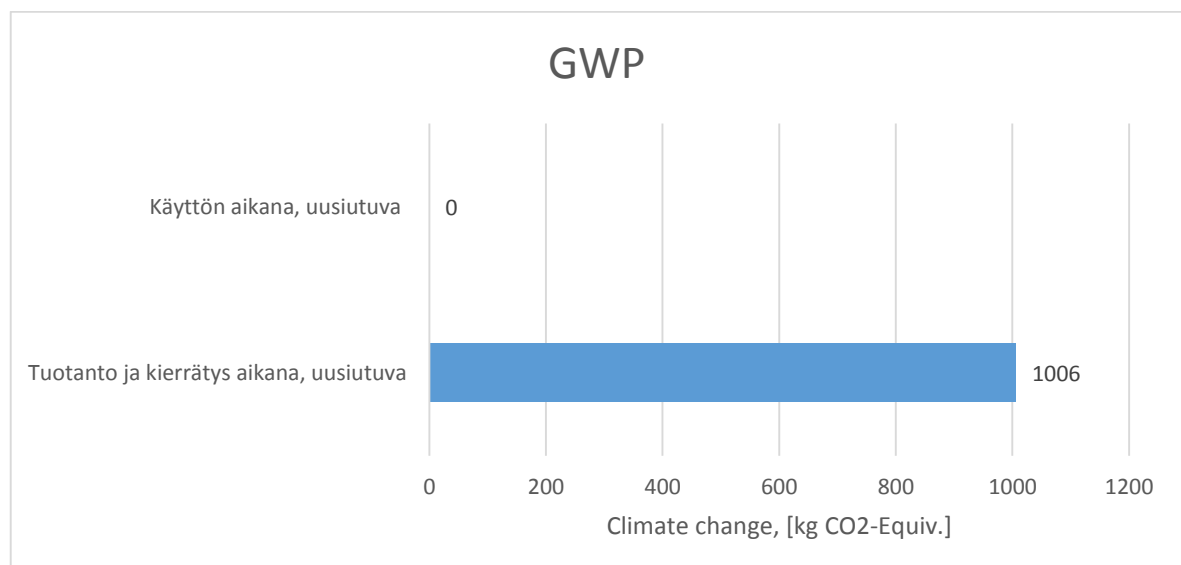
Kuva 55. Energiatohokkuusluokka IEC 60034-2 mukaan. (Szemo, 2015)

Sähkömoottoriasian yhteydessä voidaan mainita vielä se, että sekoittimen moottori käyttää käynnistyksen jälkeen enemmän energiaa kuin tasakäynnillä. Sen takia on hyvä välttää turhia lyhytaikaisia moottorin pysäyttämisiä. Usein kuitenkin seisokit ovat teknologisen prosessin määräämiä ja niitä ei voi välttää. Toisaalta seisokkien aika on sen verran pitkä, että moottorin pysähtyminen kuitenkin säästää enemmän energiaa kuin sen uudestaan

käynnistäminen kuluttaa. Moottorien pysähtyminen on myös usein tarpeellinen turvallisuuden takia.

7.2 Sähköenergia

LCA-laskelmassa on käytetty sekaenergiakertoimia ”Diesel mix at refinery” tietokannan arvoja (500 ppm rikkiä, 5,39 p-% biokomponentit, 2011), mitä vastaavat sekaenergiakäyttöä. Tutkimalla taulukoissa 18 ja 19 esitettyjä arvoja voi huomata, että CO₂-Equiv / kWh sähköenergian käytöstä on hyvin vaihteleva välillä 0 – 367 CO₂-Equiv / kWh. Siinä mielessä GWP-vaikutuksessa on suuri ero siinä, mitä lajia sähköenergiaa on käytetty. Käyttämällä esimerkiksi pelkästään uusiutuvaa energiaa saadaan sekoittimen käytön aikana GWP-vaikutukseen jopa 0 kg CO₂-Equiv ja elinkaaren aikana vain 1006 kg CO₂-Equiv, mistä suurin osa liittyy materiaalituotantoon. Tulokset on esitetty kuvassa 56, ja sitä voi verrata kuvaan 47. DALY-yksikössä se on 0,001 HH (yr) (menetetyt työelämävuodet + vammaisuuden elinvuodet) eli noin 9 tuntia. Kun verrataan tätä arvoa tapaukseen, jossa on käytetty sekasähköenergiaa (ks. osa 4.6.2), saadaan kokonaisarvo 1,049 HH (yr), eli noin 1 vuosi ja 18 päivä.



Kuva 56. Uusiutuva energia käytössä, GWP-arvot.

Paremmat GWP-vaikutusarvot voi saada myös käyttämällä ydinvoimalassa tuotettua sähköenergiaa. Uraanivoiman CO₂-Equiv - ominaispäästöt vaihtelevat noin 10 - 200g CO₂-

Equiv / kWh, ja keskiarvo on noin 60g CO₂-Equiv / kWh. (Energy Balance of Nuclear Power Generation). Kaikkein epätoivotuimmat energialajeista on jyrsinturpeesta ja palaturpeesta sekä kivihielestä tuotetut energiat.

Taulukko 18. Energiamuotojen kertoimet (Keto, 2010)

suomeksi	Polttoaine		Lämpöarvo		Päästökertoimien		
	ruotsiksi	englanniksi	$\frac{\text{MJ}}{\text{kg}_{\text{pa}}}$	$\frac{\text{kWh}}{\text{kg}_{\text{pa}}}$	$\frac{\text{g}(\text{CO}_2)}{\text{MJ}}$	$\frac{\text{g}(\text{CO}_2)}{\text{kWh}}$	$\frac{\text{g}(\text{CO}_2)}{\text{kg}_{\text{pa}}}$
Moottoribensiini	Motorbensin	Motor gasoline	43,0 (31,8 MJ/L)	11,94 (8,8 kWh/L)	72,9	262,4	3135 (2320 g/L)
Dieselöljy	Dieselolja	Diesel oil	42,8 (36,0 MJ/L)	11,89 (10,0 kWh/L)	73,6	265,0	3150 (2646 g/L)
Kevyt polttoöljy	Lätt brännolja Tunn eldningsolja	Light fuel oil Heating fuel oil	42,7 (36,7 MJ/L)	11,86 (10,2 kWh/L)	74,1	266,8	3164 (2721 g/L)
Raskas polttoöljy, rikkipitoisuus alle 1 %	Tung brännolja Tjockolja	Heavy fuel oil	41,1	11,42	78,8	283,7	3239
Kivihiihi, bituminen	Stenkol	Hard coal	24,6	6,83	94,6	340,6	2327
Maakaasu	Naturgas	Natural gas	36,0 MJ/m ³ (50,0 MJ/kg)	10,0 kWh/ m ³ (13,9 kWh/kg)	55,04	198,1	1981 g/m ³ (2752)
Jyrsinturve	Frästorv	Milled peat	10,1	2,81	105,9	381,2	1070
Palaturve	Stycketorv	Sod peat	12,3	3,42	102,0	367,2	1255
Turvepelletit ja -briketit	Torvpelletar och briketter	Peat pellets and briquettes	18,0	5,00	97,0	349,2	1746
Kierrätys-polttoaineet	Återvinningsbränslen	Recovered fuels	20,0	5,56	31,8	114,5	636

Tilastokeskuksen polttoaineluokituksessa ominaispäästökertoimet on esitetty polttoaineen alempan lämpöarvoon suhteutettuna (g/MJ). Taulukossa esitetyt massa suhteutetut päästökertoimet on laskettu kertomalla päästökertoimien polttoaineen lämpöarvolla. Suluissa esitetyt arvot eivät ole osa Tilastokeskuksen polttoaineluokitusta: ne on laskettu olettamalla polttoaineen tiheys. Moottoribensiinin tiheytenä on käytetty arvoa 740 kg/m³ (NESTE-BENSIINI 95, tyyppillinen tiheys, 15 °C), dieselöljyn 840 kg/m³ (NESTE DIESEL -5/-15, tyyppillinen tiheys, 15 °C), kevyen polttoöljyn 860 kg/m³ (NESTE-LÄMMITYSÖLJY -3, tyyppillinen tiheys, 15 °C). Maakaasun ominaisuudet on esitetty Tilastokeskuksen polttoaineluokituksessa lämpötilassa 0 °C ja paineessa 101325 Pa (tiheys noin 0,72 kg/m³). Alaindeksi pa viitataan polttoaineen massaan.

Taulukko 19. Eri energiamuotojen CO₂-päästökertoimet. (Motiva Oy, 2010, pp. 2)

Energia	Ominaispäästökerroin g CO ₂ / kWh	Ominaispäästökerroin g CO ₂ / MJ
Moottoribensiini	265	73,6
Dieselöljy	265	73,6
Kevyt polttoöljy	267	74,1
Raskas polttoöljy	284	78,8
Nestekaasut	234	65,0
Kivihiili	341	94,6
Maakaasu	198	55,04
Jyrsinturve	381	105,9
Palaturve	367	102,0
Kaikki uusiutuva energia	0	0,0
Kaikki lämpöpumput/ sähkönkulutus	200 ¹	
Sähkö, ostettu	200 ¹	
Sähkö, itse tuotettu	Sähköntuotannon polttoaineiden käytön mukainen päästökerroin	
Kaukolämpö, yhteistuotantoalueilla	220 ²	61,1
Kaukolämpö, erillistuotantoalueilla	Ks. erillinen ohje ³	

¹ Suomen keskimääräisen sähkönhankinnan CO₂-päästöjen perusteella.

² Paikkakunnilla, joilla kaukolämpö tuotetaan voimalaitoksilla sähkön ja lämmön yhteistuotantona.

³ http://motiva.fi/files/209/Laskentaohje_CO2_kohde_040622.pdf, taulukko 2.

Lähteet: Tilastokeskus, Energiatilastot Vuosikirja 2007. Sähkön ja kaukolämmön osalta Motiva Oy, Yksittäisen kohteen hiilidioksidipäästöjen laskentaohjeistus sekä käytettävät päästökertoimet, 2004.

7.3 Materiaalin käyttö

Materiaalin käyttö on toiseksi ratkaiseva arvo GWP-vaikutuksesta sekoittimen elinkaaresta. On mahdollista optimoida materiaalin käyttöä eri tavoin, kuten pienentämällä teräslastujen ja teräsjätteiden määrää sekoittimen tuotannon aikana, käyttämällä materiaalia säästäviä koneistusmuotoja, nostamalla työkuultuuria eli opettamalla työntekijät mahdollisesti säästämään tuotantomateriaalia, tai käyttämällä vaihtoehtoisia materiaaleja.

7.3.1 Vaihtoehtoiset materiaalit

Ratkaisu vaihtoehtoisen materiaalin käytöstä voidaan tehdä vain tarkan tuotantoprosessin analyysin pohjalta. Vaihtoehtoja teräslajeissa tällä hetkellä on valtavasti. Ero kylmävalssatun ja kuumavalssatun teräksen käytöstä on esitetty luvussa 6.6.4. ja käytetyn

materiaalin ominaisuudet ovat luvussa 6.3.2. Vaihtoehdot teräslajeissa tutkittavan sekoittimen tuotannossa aiheuttavat GWP-vaikutuksen arvoissa eron, mikä on noin 12 – 26 % GWP- kokonaisvaikutuksesta, eli noin 156 – 312 kg CO₂-Equiv., minkä takia kannattaa aina tehdä tarkka valinta tarvittavan teräslajin suhteen, eli millä olisi tuotantoprosessissa tarvittavat ominaisuudet, mutta GWP-vaikutus olisi mahdollisimman pieni. Ongelmana tässä on se, että LCA-analyysia ei ole tehty joka teräslajin kohdalta, ja vertailutaulukkoja 'teräsominaisuus – GWP-vaikutus' -suhteesta teräksentuottajat eivät vielä esitä asiakkaille.

Vaihtoehdot ruostumattomalle teräkselle voivat joskus löytyä myös muovien joukosta. Tällä hetkellä muovien käytössä on suurin ongelma uskottavuus asiakkaille, että muovi voisi kestää saman verran ja jopa enemmän kuin teräs. Nykyaikaisilla teräslajeilla jotkut ominaisuudet ovat jopa paremmat kuin ruostumattomalla teräksellä.

Seuraavaksi on esitelty muutama muovimateriaali, joita voisi mahdollisesti käyttää teräksen vaihtoehtona. Trolon (tuottaja Solvay Advanced Polymers), tai polyamide-imides (PAI). Nykypäivänä Trolon on kaikkein kovin termoplastinen materiaali maailmassa, ja sen lämmönkestävyys on myös erittäin hyvä: trolonista tehtyjä osia voidaan käyttää jopa 290 °C lämpötiloissa. Se on kevyt ja sillä on matala kitkakerroin, palamaton ja kestää erinomaisesti monia syövyttäviä kemikaaleja. Teollisuudessa käytetään yli 20 Trolonin pohjalta tuotettua komposiittia. Useimmat niistä on vahvistettu lasi- tai hiilikuidulla. Pääasiallisia Trolonin käyttäjiä ovat ilmailu-, raskas- ja energiateollisuus, missä sitä käytetään kompressorien turboahdinosien valmistuksessa, valmistetaan vaihteiden ja kampiakselin laakereita, venttiilijousia ja aluslevyjä, jne.

Toinen vaihtoehto on Ultramid Endure plastic, BASF-tuote, jota pidetään teräksen erinomaisena korvikkeena. Metaldyne-yritys testaa tällä hetkellä myös voimansiirtovaihdetta, mikä on valettu Victrex PEEK - korkealämpötilapolymeeristä. Se säilyttää täydellisesti omat mekaaniset ominaisuudet jopa 155 °C lämpötilassa. Victrex PEEK käyttäytyy paljon luotettavammin kuin teräs ja se on sitä 4 - 5 kertaa kevyempi ja kestävämpi.

Tällä hetkellä muovien käytön estää ensiksi kovien muovien korkea hinta, ja toinen syy on se että on hyvin vaikea löytää asiantuntijoita, kenellä olisi tarpeeksi kokemusta kovien muovien koneistuksesta, ja viimeinen syy on enempi psykologinen, ihmiset eivät usko että

muovi voi kestää paremmin kuin teräs. (Popular Mechanics, 2010) Korkea lujuisien muovien ja ruostumattomaan teräkseen mekaaniset ominaisuudet ovat esitetty liitteissä 3 ja 4, niitä on mahdollista vertailla keskenään. Materiaalin valinnassa on hyvä myös huomioida sekoittimen toimintaympäristön aggressiivisuus, esimerkiksi selluloosan valkaisuainon pH voi olla 10 – 11,5 välillä, jopa 13 pH, 70 - 80 °C lämpötilassa, mikä voi olla haastavaa muoveille.

Lasketaan kovien muovien käyttö GWP-vaikutuksen kannalta. Teräksen tiheys on 8000 kg / m³, sekoittimen osat painavat 183 kg, eli tarvitaan 0,025 m³ muovia, 10 % on huomioitu tuotantohävikkinä. Esimerkiksi PEEK Polyether-ether-ketonen tiheys on 1320 kg/m³, tästä saadaan että sekoittimen valmistukseen PEEK:ista tarvitaan 33,2 kg muovia.

$$183 \text{ kg} / 8000 \text{ kg/m}^3 * 1,1 = 0,025 \text{ m}^3$$

$$0,025 \text{ m}^3 * 1320 \text{ kg/m}^3 = 33,2 \text{ kg}$$

GWP-kertoimet termoplastisia materiaaleja varten ovat 1,01 – 5,44 kg CO₂eq / kg välistä, yleisesti polymeereille käytettävä arvo on 2,70 kg CO₂eq / kg. (Emission factors, 2012)

Taulukko 20. GWP-vaikutus teräksen ja PEEK-muovien käytöstä, vertailutaulukko.

	Kerroin, kg CO ₂ -Equiv.	Määrä	Yksikkö	kg CO ₂ -Equiv.
Teräksen valmistus	3,55	283	kg	1004
Muovin valmistus	2,70	33,2	kg	90

Taulukosta 20 näemme, että GWP:n näkökulmasta valmistusmateriaalina polymeerien tuotanto aiheuttaa vähemmän vaikutusta kuin teräksen. Tässä vaiheessa on myös hyvä tehdä vertailuanalyysi koneistus-kokoonpanovaiheesta, sekä end-of-life-vaiheesta, ja verrata tuloksia kokonaiseen elinkaariarvioinnin. Se voisi olla aiheena jatkotutkimusta varten.

8. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä tehtiin elinkaariarviointi (LCA) prosessiteollisuuden sekoittimelle Helmix HF-80 ja analysoitiin sekoittimen LCA-tulokset, vaikutus ilmaston lämpenemisen potentiaalin (GWP) suhteen, sekä tutkittiin sekoittimen LCA:n perusteella saadun GWP- vaikutuksen pienentämisen mahdollisuudet. Tutkittavaa sekoitinta käytetään sellu- ja

paperiteollisuudessa. Sekoittimen mahdolliset käyttöalueet ovat sellu- ja paperiteollisuus, raskaiden jätenesteiden käsittely, sekä muut teollisuusalueet, joissa käytetään tämän tyyppisiä laitteita. Työssä on muun muassa käsitelty sekoitusprosessit, sekoituslaitteiden tyypit, niiden rakenteiden ominaisuudet, käyttötarkoitus, toimintaperiaatteet, sekä sellu- ja paperiteollisuudessa käytävien sekoittimien yleiskatsaus, yleisesti on kuvattu myös elinkaariarviointi (LCA) -menetelmä ja sen käyttötarkoitus, tutkittavan sekoittimen LCA ja sen tulokset – sekä arvioitu vaikutus ilmaston lämpenemisen potentiaalini (GWP) suhteen, sekä GWP-vaikutuksen pienentämisen mahdollisuudet.

Tärkeimmistä tuloksista voi mainita sen, että sekoittimen kokoelinkaari ilmaston lämpenemisen potentiaali (GWP) on 750 000 kg CO₂-Equiv., niistä sekoittimen tuotanto- ja kierrätysaikana syntyy vain 1200 kg CO₂-Equiv. Suurin osa 748 000 kg CO₂-Equiv. johtuu sähköenergian kulutuksesta käytön aikana. Prosentuaalisesti jako on seuraava:

- 99,8 % - käyttöaika
- 0,2 % - tuotanto, käytöstä poistaminen ja kierrätyskausi.

Käyttöajan vaikutusta voisi pienentää 0 kg CO₂-Equiv. arvoksi käyttämällä pelkästään uusiutuva energiaa. Jos tuotantoaikana käytetty energia myös korvataan uusiutuvalla energialla, niin GWP-arvo koko elinkaaren aikana laskee 1006 kg CO₂eqv., mikä on vain 0,13 % saaduista tuloksista. Suurin osa tästä arvosta liittyy materiaaliin, tässä tapauksessa ruostumattoman teräksen tuotantoon. Paremmat GWP-arvot voidaan saada myös käyttämällä ydinvoimalassa tuotettua sähköenergiaa.

Sähköenergian kulutuksen vähentäminen käytön aikana voidaan saada aikaan myös sekoittamisprosessin optimoinnilla. Sekoittamisprosessin optimointiin liittyy muutama asia:

- alustava sekoitusta vaativan tuotannon teknologisen prosessin tutkiminen
- huolellinen moottorin, vaihteiston ja sekoittimen (potkuri) yhdistelmän valinta sekoitettavan aineen, sekoitussäiliön ja pyörimisnopeuden suhteen
- sekoittimen (potkurin) koon ja muodon valinta sekoitettavan nesteiden ominaisuuden suhteen
- parantamalla korkeaenergian omaavien virtauksien ja muun säiliössä olevan massan välistä vuorovaikutusta, käyttämällä säiliön sisäisiä konstruktiivisia ratkaisuja

virtauksien ohjaamiseen (esimerkiksi virtauksen ohjaus- ja heijastuslevyt, säiliön pohjakaltevuuslevyt ja muut)

- pyörimisnopeutta muuttamalla voidaan säästää eli lisäämällä taajuusmuuntajakäyttö
- energiatehokkaan sähkömoottorin käyttö

Muut vaikuttavat toimenpiteet GWP:n pienentämiseen prosessiteollisuuden sekoittimissa liittyy enemmän materiaalin valintaan ja materiaalin käyttöön.

8.1 Lisätutkimuksia

Yksi työn tavoitteista oli löytää uusia teknisiä ratkaisuja sekoittimen sähköenergia-kulutuksen suhteen, mutta tässä työssä on tehty vain yleinen kuvaus sekoittimien rakenteista ja konkreettisia konstruktivisia ratkaisuja sekoittimen tuottavuuden nostamiseen ja sähköenergian käytön pienentämiseen ei ole annettu, sekä vaihtoehtoisten materiaalien käytöstä on tehty vain lyhyt pinnallinen kuvaus. Sen takia työ vaatii lisätutkimuksia sekoittimien uusien rakenteellisten ratkaisujen etsimiseen. Lisätutkimustyö voisi koskea sekoittimen potkurin muodon kehittämistä, sekä mahdollisesti koetutkimukset sekoittimen käytöstä tietyssä työympäristössä ja virtauksien mallintamisesta. Nämä tutkimukset voivat olla tärkeitä, jotta saadaan realistiset arvot sähkönkulutuksesta sekoituksen aikana. Tällä hetkellä ei ole saatavilla sekoittimien sähkölukutusarvoja riippuen sekoittimien kuormituksesta. Sellaisesta olisi myös hyötyä sekä sekoitusprosessin LCA-tekijälle että prosessiteollisuuden suunnittelijalle ja laitteiden ostajalle (käyttäjälle). Työssä ei ole myöskään analysoitu laakeri- ja tiivistemateriaaleja ja rakenteita, mikä voisi olla myös oman tutkimuksensa aiheena. Virtauksien vuorovaikutukset sekoitussäiliössä voisivat myös olla yksi mahdollisista sisätutkimusaiheista, mikä voisi antaa lisää tietoa sekoitusprosessin optimoinnin suhteen. Materiaalin käyttö sekoittimien tuotannossa olisi myös yksi mahdollisista tutkimusaiheista, sekä hyvin aktuaalista voisi olla myös tutkimus vaihtoehtoisista tuotantomateriaalista, uusien nykyaikaisten materiaalien ominaisuuksien tutkiminen sekoitusprosesseissa arvioinnissa niiden mahdollisesta käytöstä.

KIRJALLISUUS

3trpd, 2014. Material Specification 316L Stainless Steel. [verkkodokumentti]. [Viitattu 18. 11. 2014] Saatavilla <http://www.3trpd.co.uk/wp-content/uploads/2013/03/316lstainless-steel-2012.pdf>

A Bauer Group Company. 2011. Submersible Motor Mixer. Optimal solution for homogenizing liquids. [verkkodokumentti]. [Viitattu 9.6.2015] Saatavilla http://www.bauer-at.com/upload/file/Prospekt_TMRW_e.pdf

Anurjev, V.I. 1980. Konesuunnittelijan käsikirja.T.3 M.:Mashinostroenie. p.728.

Bakker, A., Fasano, J. B. 2000. The Flow Pattern in an Industrial Paper Pulp Chest with a Side Entering Impeller. The Online CFM Book [verkkodokumentti]. [Viitattu 10.07.2015] Saatavilla <http://www.bakker.org/cfmbook/pprpulp.pdf>.

Christensen, T. 2011. Solid Waste Technology & Management. ISWA. 1026 pp.

Damdinova, D.R. 2000. Koneet aineiden sekoitukseen. Osa 2. Eräsekoittimet. VSGTU Ulan-Ude. pp. 3 – 5

Damgaard, A. 2010. Life-cycle-assessment of the historical development of air pollution control and energy recovery in waste incineration. Waste Management. N30. pp. 1244-1250.

Dehoff, R., 2013. Materials for aerospace. Advanced Materials and Processes, 171: 3. pp. 15-27.

Emission factors in kg CO₂-equivalent per unit. 2012. [verkkodokumentti]. [Viitattu 20.8.2015] Saatavilla http://www.winnipeg.ca/finance/findata/matmgt/documents/2012/682-2012/682-2012_Appendix_H-WSTP_South_End_Plant_Process_Selection_Report/Appendix%207.pdf

Fraunhofer ILT. 2013. Digital Photonic Production, Fraunhofer Institute of Laser Technology ILT [verkkodokumentti]. [Viitattu 10.07.2015] Saatavilla http://www.ilt.fraunhofer.de/content/dam/ilt/en/documents/product_and_services/Brochure_Digital_Photonic_Production.Pdf

Gelperin, S.I. 1981. Kemiällisten teknologian keskeiset prosessit ja laitteet. Oppikirja. Kn.1, M., Kemia. pp.177-192

Goedkoop, M., Heijungs, R. 2009. ReCiPe 2008 A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. First edition. Ministerie van VROM.

GOST R ISO 1440-2010. Environmental management Life cycle assessment - Principles and framework / National Standard of the Russian Federation. - M.: Standartinform.

Guinee, J. B. 2004. Handbook on Life Cycle Assessment Operational Guide to the ISO Standards, Kluwer Academic Publishers New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow. pp. 11-12

Guinee, J.B., Gorrée M., Heijungs R. 2002. Handbook on Life Cycle Assessment. Operational Guide to the ISO Standards. Kluwer Academic Publishers. pp.692

Horne, R., Verghese K., Grant, T. 2009. Life cycle assessment: principles, practice and prospects. CSIRO Publishing, Melbourne. 173 pp.

ILCD Handbook: General guide for Life Cycle Assessment. Provisions and action steps. 2010 European Commission-Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD). First edition. Luxemburg. Publications Office of the European Union. pp. 13-14

ILCD Handbook: Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context. 2011. European Commission-Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD). First edition. Luxemburg. Publications Office of the European Union. pp. 9-15

Ilevich, A.P. 1979. Koneet ja laitteet tehtaiden varten. Moskva: Vysshaja shkola. pp.176-220

Intech GmbH, 2015. Description of the mixing process. Methods of mixing. Agitators. . [verkkodokumentti]. [Viitattu 20. 03. 2015] Saatavilla <http://www.intech-gmbh.ru/mixers.php>

ISO (2006a): Environmental management - life cycle assessment - principles and framework. ISO 14040. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO (2006b): Environmental management - life cycle assessment - requirements and guidelines. ISO 14044. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

Karapetjanc, M.H. 1981. Yleinen ja epäorgaaninen kemia. Moskova: Kemia. p. 632

Kemistin käsikirja. 1986. M.-L.:Goshimizdat, p. 123

Keto, M. 2010. Energiamuotojen kerroin. Yleiset perusteet ja toteutuneen sähkön- ja lämmöntuotannon kertoimet. Raportti Ympäristöministeriölle Aalto-yliopiston teknillinen korkeakoulu. pp.39

Klöpffer, W., Grahl, B. 2009. Okobilanz (LCA): Ein Leitfadens für Ausbildung und Beruf. - WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 426 pp.

Lahti, J. 2015. Suunnittelija. Virtor Oy. [sähköpostiviesti] jorma.lahti@virtor.fi, 09.07.2015

Mamec Ltd. 2002. Mamec side-entry agitators – the last word in reliability. [verkkodokumentti]. [Viitattu 06.06.2015] Saatavilla http://www.mamec.fi/files/126/Side_entry_agitators.eng.pdf

Margolis, J. M. 2006 Engineering plastics handbook , ISBN 0-07-145767-4, McGraw-Hill, c2006

McDougall, F., White, P., Franke, M., Hindle, P. 2001 Integrate Solid Waste Management: A Life Cycle Inventory, 2nd Edition. Blackwell Science Ltd. pp. 198.

Milovidova, L.A., Komarova, G.V., Koroleva, T.A. 2005. Selluloosan valkaisu. Oppikirja. Arkangeli. AGTU pp. 130-131.

Moseley, M. R., Wyczalkowski, W. 2009 Total Stock Chest Mixing Innovative mixing of 6% - 14% consistency stock vessels for improved quality and energy savings. PaperAge. September/october 2009. pp. 24-27

Motiva Oy. 2010. Polttoaineiden lämpöarvot, hyötysuhteet ja hiilidioksidin ominaispäästökertoimet sekä energian hinnat. Energiatehokkuus sopimukset. pp. 2

Mtomd.info. 2010. Metallien mekaaniset ominaisuudet. Terästen mekaaniset ominaisuudet. Seoksien mekaaniset ominaisuudet. Engineering Portal. [verkkodokumentti]. [Viitattu 13.09.2015] Saatavilla <http://www.mtomd.info/archives/1171>

Database of Steel and Alloy (Marochnik). 2009 – 2015. National Technical University. Kharkov Polytechnic Institute. [verkkodokumentti]. [Viitattu 15.09.2015] Saatavilla splav-kharkov.com

Nesteiden sekoituslaitteet. 2009. Oppikirja korkeakoulun opiskelijoille. Kemerovon Teknologinen Elintarviketeollisuus Instituutti. Kemerovo. Luvut 1.6 - 1.7

Nyamekye, P. 2015. Energy and raw material consumption analysis of powder bed fusion. Case study: cnc machining and laser additive manufacturing. Master's thesis. Lappeenranta University of Technology

Outokumpu Oyj. 2013. Environmental Product Declaration Outokumpu. Stainless Steel. Long products. Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU). EPD-OUT-2013-0159-CBD1-EN pp. 2-3

Outokumpu Oyj. 2014a. Environmental Product Declaration Outokumpu. Cold Rolled Stainless Steel. Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU). EPD-OUT-2013-0159-CBD1-EN pp. 2-3

Outokumpu Oyj. 2014b. Environmental Product Declaration Outokumpu. Hot Rolled Stainless Steel. Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU). EPD-OTO-20140001-IBD1-EN pp. 2-3

Outokumpu Oyj. 2015. Kierrättämistä koskevia kysymyksiä. [esite] Outokumpu. pp.3-4

Paroc Group Oy. 2015. Mekaaniset ominaisuudet. [verkkodokumentti]. [Viitattu 12.09.2015] Saatavilla <http://www.paroc.fi/knowhow/mekaaninen-lujuus-ja-vakaus/mekaaniset-ominaisuudet>

Popular Mechanics. 2010. Plastic Engine. №87, January 2010. [verkkodokumentti]. [Viitattu 25.8.2015] Saatavilla <http://www.drive2.ru/b/804839/>

Rajeev Kumar Kanth, 2013. Analysis and Life Cycle Assessment of Printed Antennas for Sustainable Wireless Systems. Turku Centre for Computer Science. University of Turku. pp. 67-68

S. L. Exports Ltd. 2015. Pulp Chest Agitator. [verkkodokumentti]. [Viitattu 12.6.2015] Saatavilla. <http://www.papermachineries.com/pulp-chest-agitator.html>

ScienceGeek.net. 2011. Solubility Diagram. [verkkodokumentti]. [Viitattu 29.8.2015] Saatavilla <http://www.sciencegeek.net/Chemistry/taters/solubility.htm>

Shandong OUMI Machinery Manufacturing Co. 2015. Curved Paddle Impeller, [verkkodokumentti]. [Viitattu 12.6.2015] Saatavilla http://www.oumiagitator.com/Low_Viscosity_with_Impellers/Low_Viscosity_with_Impellers.html

Spx Flow Ltd. 2015. Lightnin. Mixers. [verkkodokumentti]. [Viitattu 11.6.2015] Saatavilla <http://www.spxflow.com/en/lightnin/pc-mixers/>

Stamo Ltd. 2015. Side Entry Agitators. [verkkodokumentti]. [Viitattu 8.6.2015] Saatavilla <http://www.stamo.se/en/products/stamo-side-mounted-agitators>

Sulzer Ltd, 2014a. Pulp-and-Paper-Main-Processes Pumping and Mixing Solutions for Pulp and Paper Main Processes [verkkodokumentti]. [Viitattu 05.20.2015] Saatavilla <https://www.sulzer.com/fi/Industries/Pulp-and-Paper/Pumping-and-Mixing-Solutions-for-Pulp-and-Paper-Main-Processes>

Sulzer Ltd. 2014b. SALOMIX® and Scaba Side-Mounted Agitators. [verkkodokumentti]. [Viitattu 05.06.2015] Saatavilla https://www.sulzer.com/en/-/media/Documents/ProductsAndServices/Agitators_Mixers_Dispensers/Dynamic_Mixers_and_Agitators/Brochures/SALOMIXandScabaSide_mountedAgitators_E10269.pdf

Szemo Elektrodvigatel Ltd. 2015. Energia – efektiiviset sähkömoottorit. [verkkodokumentti]. [Viitattu 15.08.2015] Saatavilla http://www.szemo.test-4you.ru/press-tsentr/article/energoeffektivnye-elektrodvigateli/?sphrase_id=17

Thinkstep Global. 2011. GaBi 5. Documentation of the GaBi 5-datasets for Life Cycle Engineering. LBP, University of Stuttgart and PE International. [verkkodokumentti]. [Viitattu 02.06.2015] Saatavilla <http://gabi-documentation-2014.gabi-software.com/xml-data/processes/1ae9069e-78b6-45f0-ac58-790eb7f971dd.xml>

Thinkstep Global. 2012. GaBi 5. Documentation for truck transport processes [verkkodokumentti]. [Viitattu 12.08.2015] Saatavilla http://www.gabi-software.com/fileadmin/gabi/documentation5/Documentation_GaBi_Transport_Processes_Truck.pdf

Toreador Stal. 2014. Valmistus ruostumattomasta teräksestä. [verkkodokumentti]. [Viitattu 21.09.2015] Saatavilla <http://www.tdstal.ru/nerz/vidnm.html>

Tschamber Ltd. 2015. Agitators. [verkkodokumentti]. [Viitattu 10.6.2015] Saatavilla <http://mut-tschamber.de/en/products/agitators/fgd-agitators/>

Tshevits, L.I. 1990. Atlas - vaihteistojen mallit. K: Vysshaja shkola. p. 151

Tulmesh. 2015 [verkkodokumentti]. [Viitattu 02.7.2015] Saatavilla <http://tulmesh.ru/>

Tähkämö, L. 2014 Cycle Assessment of Solid State Lighting Final Report. International Energy Agency 4E Life. US Department of Energy (DOE) and UK Department of Environment, Food and Rural.

Wallner, A., Wenisch, A. 2011. Energy Balance of Nuclear Power Generation. Austrian Institute of Ecology. Austrian Research Promotion Agency. Vienna 2011. pp. 7

Virtor Oy, Teknilliset piirustukset, 2014

Xylem Ltd. 2011a. Flygt low-speed mixers. [verkkodokumentti]. [Viitattu 7.6.2015] Saatavilla <http://www.xylem.com/Assets/Resources/1102-Flygt-Lowspeedmixers-Mixing.pdf>

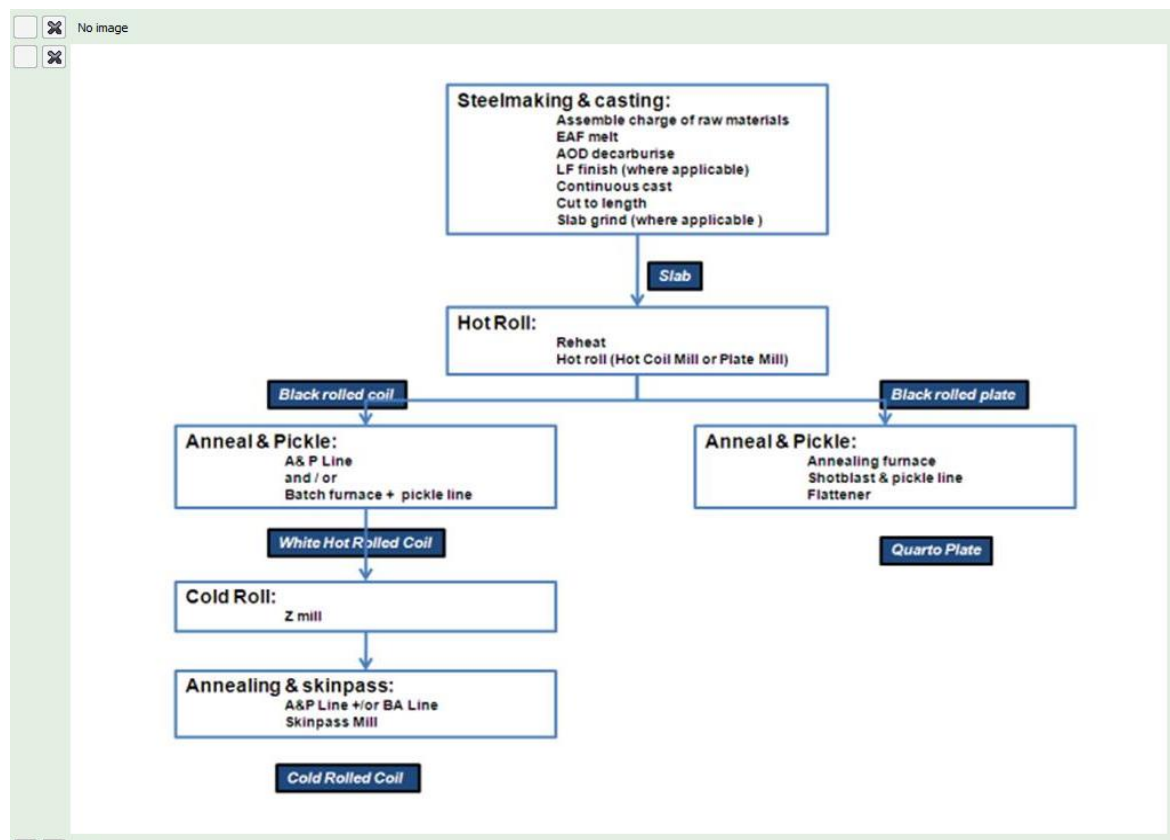
Xylem Ltd. 2011b. Flygt compact mixers. [verkkodokumentti]. [Viitattu 7.6.2015]
Saatavilla <http://www.xylem.com/Assets/Resources/1103-Flygt-Compactmixers-Mixing.pdf>

LIITTEET

Liitte 1. HF-80 sekoittimen osaluettelo.

Osa	Kuvaus	Nimike	Piir.n:o	Standardi	Materiaali	Mitat	Määrä	Paino
1	Sekoitinrunko	xxxxxxxx	2V0000657-00				1	85
2	Sekoitinakseli	xxxxxxxx	3V0000627-00				1	53,1
3	Tiivistepesä	xxxxxxxx	2V0000662-00				1	24,2
4	Potkuri	xxxxxxxx					1	x
5	Liukuholkki	xxxxxxxx	4V0000656-00				1	0,3
6	Tiivisteen suojus	xxxxxxxx	4V0000669-00				1	0,87
7	Lukituslevy	xxxxxxxx	4V0000587-00				1	0,2
8	Mekaaninen tiiviste	xxxxxxxx	LP-D-V14/45-DE				1	x
9	Vaihdemoottori	xxxxxxxx	SEW FAF-87RDE180L 18,5 kW, 1470 rpm, 380 V, 50 Hz, i=5,63 + TAMU MC07B0150-4-00/FSC12B				1	240
10	Laakeri	xxxxxxxx	6212				1	x
11	Akselitiviste	xxxxxxxx	Garlock PS, back to back		Gylon blue	90x70x10	1	x
12	Akselitiviste	xxxxxxxx		DIN 3760	NBR	A85x100x12	1	x
13	O-rengas	xxxxxxxx			NBR	85x3,5	2	x
14	O-rengas	xxxxxxxx			NBR	60x2	1	x
15	Levytiiviste	xxxxxxxx	4V0000661-00				1	x
16	Tasakilla	xxxxxxxx		DIN 6885-1	EN 1.4404	14x9x85	1	x
17	Tasakilla	xxxxxxxx		DIN 6885-1	C45	18x11x90	1	x
18	6-ruuvi	xxxxxxxx		DIN 933	A4-80	M16x50	1	x
19	6-koloruuvi	xxxxxxxx		DIN 912	A4-80	M12x90	6	x
20	6-koloruuvi	xxxxxxxx		DIN 912	A4-80	M8x12	4	x
21	6-kolopidätinruuvi	xxxxxxxx		DIN 916	A4-80	M8x10	4	x
22	Kierretanko	xxxxxxxx		xxxxx	A4-80	M16x80	4	x
23	6-mutteri	xxxxxxxx		DIN 934	A4	M16	4	x
24	Lukitusaluslevy	xxxxxxxx	Nord-Lock		SS	NL16ss	4	x
25	Lukitusaluslevy	xxxxxxxx	Nord-Lock		SS	NL12ss	6	x
26	Lukitusaluslevy	xxxxxxxx	Nord-Lock		SS	NL8ss	4	x
27	Suora lähtöliitin		Ermeto			GE06ZLRED71	1	
28	Putki 6x1					L=800	1	
29	Pulssianturi SPM 40000+kaapeli L=2 m		(OPTIO, ei tarvita testisekoittimessa)				-	
27	6-ruuvi	Sisältyy vaihdetoimitukseen					1	x
28	Lukitusaluslevy	Sisältyy vaihdetoimitukseen					1	x
29	Lukkorengas	Sisältyy vaihdetoimitukseen					1	x

Liitte 2. Ruostumattoman teräksen tuotanto, prosessin kuvaus kaava. (GaBi Databases)



Mekaaniset ominaisuudet, lämpötilassa T=20C

	Koko	σ_B - vetolujuus	σ_T - myötöraja	δ_5 - suhteellinen pidennys	ψ - suhteellinen supistuminen	Lämpökäsittely
	mm	MPa	MPa	%	%	
Muototeräkset ja palkit	Ø60	490	196	40		karkaus 1070- 1100oC, jäädytys - vesi
Forgings (tokomo)		470	176	35-40	45-55	
Paksu levy		490	196	40		karkaus 1080- 1100oC, jäädytys - vesi
Ohut levy		490	196	40		karkaus 1030- 1070oC, jäädytys - ilma

Liitte 3. Korkea lujiset muovit, mekaaniset ominaisuudet. (Margolis, 2006)

Property	Test method	units	neat PAI	30% GF PAI	30% CF PAI
Tensile Strength	ASTM D 638	MPa (kpsi)	152 (22.0)	221 (32.1)	221 (32.0)
Tensile Modulus	ASTM D 638	GPa (kpsi)	4.5 (650)	14.5 (2,110)	16.5 (2,400)
Tensile Elongation	ASTM D 638	%	7.6	2.3	1.5
Flexural Strength	ASTM D 790	MPa (kpsi)	241 (34.9)	333 (48.3)	350 (50.7)
Flexural Modulus	ASTM D 638	GPa (kpsi)	5.0 (730)	11.7 (1,700)	16.5 (2,400)
Compressive Strength	ASTM D 695	MPa (kpsi)	221 (32.1)	264 (38.3)	254 (36.9)
Shear Strength	ASTM D 732	MPa (kpsi)	128 (18.5)	139 (20.1)	119 (17.3)
Izod Impact Strength	ASTM D 256	J/m (ftlb/in)	144 (2.7)	80 (1.5)	48 (0.9)
Izod Impact Strength- Unnotched	ASTM D 4812	J/m (ftlb/in)	1070 (20)	530 (10)	320 (6)

Heat Deflection Temperature @ 264 psi	ASTM D 648	°C (°F)	278 (532)	282 (540)	282 (540)
Coefficient Linear Thermal Expansion	ASTM D 696	ppm/°C (ppm/°F)	31 (17)	16 (9)	9 (5)
Volume Resistivity	ASTM D 257	ohm-cm	2e17	2e17	
Specific Gravity	ASTM D 792		1.42	1.61	1.48
Water Absorption, 24 hr	ASTM D 570	%	0.33	0.24	0.26

Wear-resistant PAI grades

Property	Test method	units	4275	4301	4435	4630	4645
Tensile Strength	ASTM D 638	MPa (kpsi)	117 (16.9)	113 (16.4)	94 (13.6)	81 (11.8)	114 (16.6)
Tensile Modulus	ASTM D 638	GPa (kpsi)	8.8 (1,280)	6.8 (990)	14.5 (2,100)	7.4 (1,080)	18.6 (2,700)
Tensile Elongation	ASTM D 638	%	2.6	3.3	1.0	1.9	0.8

Flexural Strength	ASTM D 790	MPa (kpsi)	208 (30.2)	215 (31.2)	152 (22.0)	131 (19.0)	154 (22.4)
Flexural Modulus	ASTM D 790	GPa (kpsi)	7.3 (1.060)	6.9 (1,000)	14.8 (2,150)	6.8 (990)	12.4 (1,800)
Compressive Strength	ASTM D 695	MPa (kpsi)	123 (17.8)	166 (24.1)	138 (20.0)	99 (14.4)	157 (22.8)
Izod Impact Strength, Notched	ASTM D 256	J/m (ft-lb/in)	85 (1.6)	64 (1.2)	43 (0.8)	48 (0.9)	37 (0.7)
Izod Impact Strength, Unnotched	ASTM D 4812	J/m (ft-lb/in)	270 (5)	430 (8)	210 (4)	160 (3)	110 (2)
Heat Deflection Temperature at 264 psi	ASTM D 648	°C (°F)	280 (536)	279 (534)	278 (532)	280 (536)	281 (538)
Coefficient Linear Thermal Expansion	ASTM D 696	ppm/°C (ppm/°F)	25 (14)	25 (14)	14 (8)	16 (9)	9 (3)