



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Jonne Mattila

KOMPOSTILÄMMÖN HYÖDYNTÄMINEN

Tekniikka

2022

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Jonne Mattila
Opinnäytetyön nimi	Kompostilämmön hyödyntäminen
Vuosi	2022
Kieli	suomi
Sivumäärä	54
Ohjaaja	Jukka Hautala

Tämän opinnäytetyön tarkoitus oli tutkia kompostiastian mahdollisuutta toimia myös lämmönlähteenä pienmuotoiseen lämmitykseen. Pyrkimyksenä oli perehtyä biojätteen energiatiheyteen sekä sen hyödyntämiseen eri talousmalleissa käyttämällä kompostointiin liittyviä tutkimuksia sekä fysiikan kaavoja.

Energiatiheyden selvittämisen jälkeen simuloitiin kompostiastiasta vapautuva lämpöenergia, mikä kulkee astian läpi siirtyvän ilmapirran mukana. Tutkittiin myös mahdollisuutta siirtää tätä lämpöenergiaa lämpöä johtavien pintojen kautta lämmönvarastointiin tarkoitettuihin laitteisiin. Tämän jälkeen arvioitiin keskimääräinen vuotinen jätteen tuotto henkilöä kohden Suomessa ja teoreettinen lämmityksen taso eri asukasmäärää kohden sekä ravintoloita kohden laskettiin.

Tuloksista kävi ilmi, että kompostiastiasta vapautuvan lämpöenergian määrä on todella pieni verrattuna muihin lämmitysmuotoihin. Tämän lisäksi kompostilämmön hyödyntäminen on työlästä sekä vaatii useamman henkilön ruokajätevirran, jotta saataisiin syntymään suurempia hyödynnettäviä lämpömääriä. Kompostilämmössä on kuitenkin potentiaalia isommissa asuntoryhmissä kuten kerrostalossa sekä ravintoloissa.

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Energiatekniikka

ABSTRACT

Author	Jonne Mattila
Title	Utilization of Composting Heat
Year	2022
Language	Finnish
Pages	54
Name of Supervisor	Jukka Hautala

The purpose of this thesis was to study the possibility of a composting bin to also act as a source of heat in different scales of economies. The goal was to approximate the energy density of food waste and utilize it in heat energy production using available studies on compost as well as physical formulas.

Different methods of extracting the heat energy in the composting bins were studied, by first simulating the airflow going through the bin which would heat the room the bin is in. Heat transfer between the bin and a heat storage system using convection was also explained and calculated. After these heat transfer methods, the amount of food waste per person was researched and the theoretical amount of produced heat was approximated for different sizes of housing complexes, as well as restaurants.

The results showed that small amount of heat energy is emitted from composting bins compared to conventional methods. In addition to this, utilizing this heat needs a lot of work, and the food waste of multiple people are needed to be able to get usable amounts of heat. Compost heating is still potentially viable in bigger apartments, such as multi-storey buildings and in restaurants.

Keywords

Composting, heat energy, radiators

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	7
2	KOMPOSTOINTI.....	9
2.1	Kompostoinnin perusasiat	9
2.2	Jätteen kompostoitumisen vaiheet.....	9
2.3	Kompostoitumiseen vaikuttavat tekijät.....	11
2.3.1	Lämpötila	11
2.3.2	Happamuus.....	12
2.3.3	Raaka-aine.....	12
2.3.4	Hapen kierto	13
2.3.5	Kosteus.....	14
2.4	Mikrobikanta	14
2.5	Biojätteen lämpöenergia.....	15
3	LÄMMITYS KONVEKTIOILLA.....	17
3.1	Esimerkkikompostiastian valinta.....	17
3.2	Simulaation parametrit	19
3.3	Huoneen sekä astian lämpötilaero	25
3.4	Huoneen sekä astian kosteusero	26
3.5	Massavirta sekä pinta-ala.....	27
3.6	Päätelmät	28
4	LÄMMÖN SIIRTÄMINEN KOMPOSTIASTIASTA.....	31
4.1	Materiaali	33
4.2	Järkevät etäisyydet.....	34
5	KÄYTTÖVAIHTOEHTOJA.....	38
5.1	Lämpöenergia suoraan sisätilaan.....	38
5.2	Putkilla lämpövaraajaan	38
5.3	Lämpösähköinen generaattori	39

6	MAHDOLLISIA KÄYTTÖKOhteITA.....	44
6.1	Omakotitalo.....	45
6.2	Kerrostalo	45
6.3	Ravintola.....	46
7	YHTEENVETO.....	48
7.1	Mahdollisia tulevaisuuden jatkotutkimuskohteita	48
7.1.1	Mikrobikannan optimointi	48
7.1.2	Ilmateiden optimointi	48
7.1.3	Lämpösähkötutkinto	49
7.1.4	Tutkimustyö	49
	LÄHTEET.....	50

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1. lämpösähköilmiö eli Seebeckin ilmiö. Kuva: cdn.ttgtmedia.com	40
Kuva 2. Lämpöpareja kytkettynä sarjaan. Kuva: Termoelectricsolutions.com	42
Taulukko 1. Lämpövirran muutos lämpötilaeron suhteen.....	26
Taulukko 2. Lämpövirran muutos kosteuseron suhteen.....	27
Taulukko 3. Lämpövirran muutos pinta-alan suhteen.	28
Taulukko 4. Simulaation tulokset.	28
Taulukko 5. Lämpövirran muutos säilön halkaisijan suhteen	30
Taulukko 6. Eri materiaalien lämmönjohtavuuksia.	33
Taulukko 7. Eri kokoisten putkien hukkalämpö metriä kohden.....	36

1 JOHDANTO

Lähes jokaisessa asuinkodissa sekä yritysrakennuksessa syntyy biojätettä. Useimmissa tapauksissa nämä jätteet siirtyvät logistiikan toiminnalla jätteiden käsittelykeskuksiin, missä biojäte prosessoidaan muun muassa biokaasuksi sekä mullaksi. Osa kotitalouksista ja ehkä yritysrakennuksista kuitenkin omistaa oman biojätteen kompostointiastian, missä biojäte maadutetaan aerobisesti.

Tässä työssä tutkitaan sekä pohditaan, minkälaisia mahdollisuuksia on käyttää näistä kompostiaatioista syntyvää lämpöenergiaa järkevästi sekä kuinka tätä lämpöenergiaa voisi käyttää lämmittämisessä tai ottaa lämminvesivaraajaan talteen ja käyttää muualla myöhemmin. Tässä työssä myös tutkitaan erilaisten talouksien kokojen mahdollisuuksia käyttää kompostoinnista syntyvää lämpöenergiaa heidän päivittäisessä elämässä. Jos perheet tai muut asukasryhmät eivät kompostoi ruokajätettä itse, nämä jätteet siirretään jonkinlaiseen jätteenkäsittelylaitokseen. Joillakin näistä laitoksista on olemassa biokaasua tuottava laitos, missä nämä ruokajätteet muutettaisiin biokaasuksi, usea jätteenkäsittelylaitos polttaa kaikki jätteensä mukaan lukien ruokajätteet. Vaikka jätteiden polttamalla saadaan jätteessä oleva potentiaalinen energia käyttöön nopeammin, se tuottaa paljon savua sekä kasvihuonekaasuja. Tämän lisäksi ruokajätteessä olevan suuren veden määrän takia kaikki ruokajätteet tulisi työstää ensiksi paremmin palavampaan muotoon ennen polttamista.¹ Jos näiden talousryhmien oma kompostointi tuottaisi tarpeeksi suuren lämpövirran, jotta sitä voisi hyödyntää järkevästi, ruokajätteistä syntyisi kasvihuonekaasujen sekä savun sijaan vesihöyryä, mikä on paljon terveellisempää ympäristölle.

¹ link.springer.com, ruokajätteiden käsittelymenetelmiä

Tämän työn eri kappaleissa käydään läpi ruokajätteen tuottamaa lämpöenergiaa, mikä tapahtuu kompostoinnin aikana sekä pohtia tämän lämpöenergian hyödyntämismahdollisuuksien kannattavuutta. Ensiksi perustellaan kompostoinnista syntyvä lämpöenergia käymällä läpi kompostoinnin perusteet sekä kaikki tärkeät komponentit tehokkaassa kompostointiprosessissa.

Tämän jälkeen lasketaan tästä kompostiprosessista syntyvän lämpövirran mahdollisuutta toimia lämpöpatterina käyttäen aikaisempien tutkintojen antamaa ruokajätteen energiatiheyttä. Tässä työssä myös tutkitaan tämän lämmön varastointimahdollisuuksia.

Lopuksi perehdytään tämänlaisen kompostilämmittimen käyttöä erikokoisissa talouksissa kuten omakotitalo, kerrostalo sekä ravintola.

2 KOMPOSTOINTI

Ruokajätteen lämmön tuottamiseksi sekä hyödyntämiseksi tulee saada aikaan tämän kyseisen jätteen kompostoituminen. Alla olevissa kappaleissa käydään läpi kompostoinnin perusteet sekä siihen vaikuttavat tärkeät olosuhteet.

2.1 Kompostoinnin perusasiat

Kun eliöt (eläin tai kasvi) kuolevat ja niiden rakenteet alkavat mädäntyä, niin ympäristössä olevat pieneliöt sekä sienet alkavat oma-aloitteisesti tuhoamaan näitä orgaanisia rakenteita ja ottamaan niistä raaka-aineyhdisteitä omiin tarpeisiinsa. Toimintansa mukaisesti näitä pieneliöitä sekä sieniä kutsutaan tuhoajiksi ja niitä on lukematon määrä maailman luonnossa. Ihminen pystyy käyttämään tuhoajien toimintaa hyväkseen kasvien mullasta biokaasun luomiseen sijoittamalla kyseisiä tuhoajia sekä orgaanista ainetta kontrolloituun ympäristöön, kuten kompostiastiaan.

Tässä kyseisessä aiheessa käydään läpi aerobisen tavan kompostoida biojätettä. Se käyttää hyväkseen happea, joten mikrobien (tuhoajien) työssä syntyy pääasiassa paljon lämpöä sekä vesihöyryä, sekä niiden työnsä jälkeen jäljelle jää kasvimultaa. Jos kyseessä olisi anaerobinen kompostointi, niin täysin hapettomassa tilassa syntyy pääasiassa metaanikaasua (biokaasua) sekä hiilidioksidia.

2.2 Jätteen kompostoitumisen vaiheet

Kompostoituminen ajetaan yleensä karkeasti neljään eri vaiheeseen prosessin eri lämpötilaprofiilien perusteella. Nämä vaiheet ovat mesofiilinen-, termofiilinen-, jäähtymis- sekä kypsymisvaihe.

Kompostoituminen alkaa mesofiilisessa vaiheessa, missä mesofiiliset mikrobit, eli mikrobit, mitkä toimivat sekä lisääntyvät matalammissa lämpötiloissa (suurimmillaan 45°C). Kun nämä mesofiiliset mikrobit hajottavat orgaanista materiaalia ja li-

sääntyvät, lämpöenergiaa vapautuu ympäristöön. Normaaleissa olosuhteissa lämpötila ei nouse paljoa, mutta kompostointiastiasa lämpötila nousee. Mesofiiliset mikrobit työstävät orgaanista ainetta tehokkaasti lämpötilaan 45 °C asti, missä termofiilinen mikrobikanta pääsee valloilleen, ja mesofiilinen mikrobikanta ei kykene toimimaan enää optimaalisesti. Lämpötiloissa 45 °C < 52 °C mesofiiliset mikrobit jäävät vähitellen jälkeen, kun termofiiliset mikrobit alkavat työstämään orgaanista ainetta nopeammin ja nopeammin.²

Termofiilisessa vaiheessa (45 °C < 70 °C) termofiiliset mikrobikannat alkavat kunnolla työstämään orgaanista ainetta. Nämä mikrobit ovat paljon tehokkaampia, kuin mesofiiliset mikrobit, ja kompostiastian lämpötila kasvaa nopeasti, sekä voi kasvaa jopa 70 °C asti. On olemassa myös bakteereja, jotka kestävät jopa 110 °C, mutta nämä ovat harvinaisia tapauksia ja yleensä eivät tuota pelkästään vesihöyryä sekä tarvitsevat rautaa, rikkiä tai jotain muuta harvinaisempaa toimiakseen. Tästä syystä tässä työssä ei keskitytä näihin hypertermofiilisiin bakteereihin. Termofiiliset mikrobit jatkavat työtään, kunnes helposti työstettävää materiaalia ei ole enää jäljellä. Tämän vaiheen aikaikkuna on laaja; se voi kestää muutamasta päivästä pariin kuukauteen joissain tapauksissa. Termofiilisen vaiheen ajan keskiarvo on kuitenkin 2–3 viikon sisällä.³

Jäähtymisvaihe alkaa, kun termofiilillä mikrobeilla ei ole enää helposti työstettävää orgaanista materiaalia, joten kompostiastian lämpötila alkaa viilentyä. Tässä vaiheessa, kun lämpötila on tippunut tarpeeksi matalaksi, erilaiset hajottajat, kuten sienet sekä pääsevät hajottamaan karkeampaa orgaanista jätettä pienemmiksi komponenteiksi makro-organismien kanssa, kuten madot ja toukat. Termofiiliset

² webpal.com, kompostoinnin vaiheet

³ dlr.de, hypertermofiilibakteerit

mikrobit voivat jatkaa työtänsä tämän jälkeen, joten lämpötila voi heitellä jonkin aikaan tässä vaiheessa.⁴

Kypsymisvaihe on viimeinen vaihe, mikä alkaa, kun kaikki orgaaninen materiaali jätteessä on hajotettu komponenteiksi ja mikrobeilla sekä makro-organismeilla ei ole enää mitään, mitä työstää. Kypsymisvaihe on todella pitkä ja voi kestää jopa 6 kuukautta, missä ajassa patogeenit eli taudinaiheuttajat tuhoutuvat ja komposti on turvallista kasveille.⁵

Tähän työhön tärkeimmät vaiheet ovat kaksi ensimmäistä (mesofiilinen sekä termofiilinen), koska lämpöenergian tuotto tapahtuu niissä kyseisissä vaiheissa. Mitä kompostille tehdään näiden vaiheiden jälkeen, ei ole lämmön tuoton kannalta tärkeää.

2.3 Kompostoitumiseen vaikuttavat tekijät

Koska kompostoituminen on eloperäisten hajottajien tuottama ilmiö, nämä hajottajat tarvitsevat tietynlaiset olosuhteet, jotta niiden ympäristö olisi niille elinkelpoinen ja ne pystyvät hajottamaan biojätettä tehokkaasti. Näihin olosuhteisiin vaikuttaa: lämpötila, happamuus, käytössä olevat ravinteet eli raaka-aineet, hapen kierto, kosteus sekä hajottajakannat itsessään. Alla olevissa kappaleissa selitetään jokaisen komponentin tärkeys sekä vaikutus kompostointiprosessiin.

2.3.1 Lämpötila

Lämpötila on hyvä indikaattori kompostoinnin toimivuudesta sekä tehokkuudesta. Kun kompostiastian lämpötila nousee tasaisesti ja nopeasti, niin tietää mikrobi-

⁴ webpal.com, kompostoinnin vaiheet

⁵ webpal.com, kompostoinnin vaiheet

kannan olevan terve ja että siellä on riittävästi hajotettavaa materiaalia. Liian korkea sekä liian matala lämpötila heikentää mikrobien hajottamisprosessin nopeutta.

2.3.2 Happamuus

Olosuhteiden happamuuden pystyy näyttämään sen pH-arvon selventämisellä. Biojätteen pH-arvo kuvastaa siinä olevia vapaita vetyioneja, mitä bakteerit hyödyntävät. Aerobisessa kompostoinnissa on todettu, että pH-arvon alue koko kompostointiprosessin aikana tulisi pysyä 7,5 ja 6 välillä; Paras loppu -pH tulisi olla 7. Tulee ottaa myös huomioon se, että biojätteen pH-arvo laskee sen hajoamisprosessissa, sillä mikrobit käyttävät näitä vapaita vetyioneja sekä tuottavat orgaanisia happoja, joten biojätteen pH alkuvaiheessa olisi hyvä olla lähempänä 7,5.

Yksi hyvä tapa ylläpitää tarpeeksi neutraalia ympäristöä kompostiastiassa on tuoda sinne kalsiumia, esimerkiksi puutarhakalkkia. Tämä nostaa biojätteen pH-arvoa, mikä on hyvä, jos mikrobien ympäristö todetaan liian happamaksi. Tulee kuitenkin ottaa huomioon, että pH-arvoa on helpompi nostaa, kuin laskea, niin kannattaa olla tarkka, ettei tuota liian emäksistä ympäristöä mikrobeille.⁶

2.3.3 Raaka-aine

Biojätteen koostumus vaikuttaa sen hajoamisnopeuteen. Tämä ilmaistaan jätteen hiiliatomien sekä typpiatomien suhteella eli CN-luvulla. Hiili on kaiken elämän perusta maapallolla ja se on päärakennusaine, ja mikrobit tarvitsevat typpeä niiden omassa proteiinisynteessissä, missä ne tuottavat omat proteiininsa. Jos CN-luku on esimerkiksi 5, niin jokaista typpiatomia kohden löytyy 5 hiiliatomia. CN-luvun tulee

⁶ Thompson, K. & Salonen, S. 2008

olla hiilen eduksi. Tehokkain CN-luku biojätteessä on 4–9 välillä, milloin on todettu, että suurimman työn tekevät mikrobit toimivat parhaiten.⁷

Tässä on kuitenkin otettava huomioon se, että mikrobit tarvitsevat hiiltä ja typpeä muuhunkin kuin lisääntymiseen. Osa hiilestä sekä typestä palavat prosessissa ja muutenkin haihtuvat pois hiilidioksidina. Itse asiassa suurin osa, noin $\frac{2}{3}$ mikrobien käyttämästä hiilestä haihtuu pois hiilidioksidina. Tästä syystä on hyvä ajatella kompostiastian CN-luvun puolittuvan sen jätteen kompostointiprosessin aikana. Teoriassa CN-luku kompostoinnin alussa olisi hyvä olla jopa 30, sillä se tulee olemaan 13 ja 8 välillä kompostoinnin loppuvaiheessa.⁸

2.3.4 Hapen kierto

Hyvä nyrkkisääntö kompostoinnissa on se, että kompostointiastia ei voi olla liian ilmava. Mikrobit tarvitsevat hyvän hapen kierron pysyäkseen tehokkaana niiden aerobisessa toiminnassaan. Ilman hyvää hapen kiertoa tämä prosessi muuttuisi anaerobiseksi ja tämä mikrobikanta hyvin luultavasti ei olisi mitenkään tehokas. Tämän lisäksi anaerobinen mätäneminen tuottaa sivutuotteena paljon pahanhajuisia kaasuja kuten ammoniakkia ja rikkivetyä. Astian ilmavuuden turvaamiseksi on todettu kolme tehokasta konstia: kompostiastian sisällön kääntely, kuitupitoisemman jätteen lisäämistä biojätteeseen, sekä ilmaputkien asentaminen kompostiastiaan. Kun jätettä käännellään, sinne pääsee ilma virtaamaan paljon vapaammin, mikä estää hapen puutteen. Ja kun kompostoituvassa massassa on paljon kui-

⁷ Thompson, K. & Salonen, S. 2008

⁸ Thompson, K. & Salonen, S. 2008

tupitoisia komponentteja, kuten oksia tai leikkuujätettä, niin siellä on paljon hiitaasti maatuvia osia, mitkä pitävät sitä painumasta kasaan ja antavat ilman kiertää paljon vapaammin kompostiastiassa.⁹

2.3.5 Kosteus

Kaikki maaperän eliöt sekä pieneliöt, kuten mikrobit kompostiastiassa tarvitsevat maaperän kosteutta toimiakseen. Liian kuivassa olosuhteissa ne eivät selviydy ja liian kosteissa olosuhteissa hapen kierto rajoittuu, mikä johtaa biojätteen anaerobiseen hajottamisprosessiin. On todettu, että tehokkaimman kompostoinnin taakamiseksi kompostiastiassa veden osuus on oltava 50–60 % biojätteen kokonaisuudesta. Tämä antaa sekä mikrobeille terveelliset elinympäristöt, että hapelle tarpeeksi vapaita ilmatiet sen virtaukselle.

2.4 Mikrobikanta

Tarkemmin sanottuna hajottajista bakteerit ovat suurin tekijä kompostiastian kompostoinnissa. Jokainen bakteerilaji on erilainen: eri optimilämpötila, eri toimintatehokkuus, eri toimintalämpötila-alue yms. Ja koska lämpötilan tulisi nousta normaaleista lämpötiloista jopa 60 °C – 70 °C asti, niin pelkästään yksi bakteerilaji ei yleensä riitä tähän prosessiin.

Tietyn bakteerikannan eristäminen ja käyttäminen on todella vaikeaa. Tämän tutkimuksen tarkoitus olisi tutkia normaaleissa olosuhteissa käytettyjä kompostiastioita. Tästä syystä on hyvä tietää yleisimmät bakteerikannat, jotka esiintyvät biojätteessä.

⁹ Thompson, K. & Salonen, S. 2008

Kaikista yleisimmät ruokaperäiset bakteerit ovat Salmonella, Escherichia coli ja Listeria monocytogenes.¹⁰ Koska nämä esiintyvät usein toistensa kanssa, näitä myös tutkitaan paljon yhdessä. Suurin terveellinen lämpötila, missä nämä bakteerit lisääntyvät tehokkaasti on noin 55 °C. Yleisin termofiilinen bakteerikanta on Bacillus stearothermophilus,¹¹ mikä nostattaa lämpötilaa yleensä 60 °C – 65 °C alueelle, jopa 70 °C asti.

2.5 Biojätteen lämpöenergia

Energiatiheydellä tarkoitetaan sitä, kuinka paljon lämpöenergiaa kompostiastiassa on sen massa suhteutettuna, kun sen sisällöt tiedetään. Tätä arvoa ei valitettavasti voi löytää helposti kirjasta, sillä siihen arvoon kuuluu monta muuttujaa. Aerobisen kompostoinnin prosesseja sekä lämmöntuottoa tutkitaan jatkuvasti entistä enemmän, joten saatavilla oleva tieto eri orgaanisten jätteiden energiantuotomääristä kasvaa. Tällä hetkellä kuitenkin tähän liittyvää tietoa on aika vähän saatavilla.

Yksi tapa pohtia kompostiastian lämmöntuottoa on etsiä näitä arvoja tehdyistä tutkimuksista, vertailla sekä soveltaa saatuja arvoja tähän tarkoitukseen. Yleisimmät tutkimukset ovat yleensä tehty käyttäen maatalousjätettä, kuten olkien varsia tai eläinten jätöksiä. Näille jätetyypeille on annettu lämpöarvot käyttäen suuretta kJ/kg. Tämä on kyseisen jätetyypin entalpia: energiamäärä suhteutettuna massaan. Kun entalpian yhdistää massa, saadaan astian teoreettinen lämpöpotentiaali jouleina (J).

¹⁰ Jiang, X. Kim, J. Yleiset mesofiiliset bakteerit

¹¹ Coosemans, J. Deprins, K. Termofiiliset bakteerit

Eri biojätetyyppien entalpia-arvoja eli lämpöarvoja:¹²¹³¹⁴

Puulastu 1,0 MJ/kg => 165 MJ/m³

Oksahakkeet 1,2 MJ/kg => 144 MJ/m³

Ruokajäte 2,667–4,284 MJ/kg => 1066–1713 MJ/m³

Ruokajätteellä on suuri energiatilavuus johtuen sen suuresta CN-luvusta sekä suhteellisen korkeasta tiheydestä. Tähän liittyviä tutkimuksia ei ole vielä tehty niinkään laajasti, sillä yleisempi tapa tuottaa energiaa ruokajätteestä on kuivata sekä polttaa se.¹⁵ mutta nämä olivat tämänhetkisistä tutkimuksista yleisimpien tulosten keskiarvot. Näissä tutkimuksissa käytiin läpi enemmän maatalouteen liittyvää orgaanista jätettä, mikä ei liity tähän opinnäytetyöhön. Ruokajäte on keskeisin orgaanisen jätteen muoto, mihin tässä työssä keskitytään.

Tutkimuksen mukaan 1 000 kg kuivattua ruokajätettä polttamalla saataisiin noin 1,22 GJ energiaa, eli 1 kg tuottaisi 1,22 MJ energiaa. Vaikka ruokajätteen kompostoinnin sekä polttamisen tuottama potentiaalisen lämpöenergiämäärän ero on aika suuri (1,22 MJ/ Kg verrattuna 2,67 MJ/ kg), ruokajätteen poltto on paljon yleisempää koska se on paljon nopeampaa sekä helpompaa verrattuna tämän saman jätteen kompostoimiseen lämpöenergian vapauttamiseksi.¹⁶

¹² sciencedirect.com orgaanisten jätteiden energiatilavuuksia

¹³ mdpi.com, orgaanisten jätteiden energiatilavuuksia

¹⁴ nswai.org, ruokajätteiden tiheyksiä

¹⁵ link.springer.com, ruokajätteiden käsittelymenetelmiä

¹⁶ link.springer.com, ruokajätteiden käsittelymenetelmiä

3 LÄMMITYS KONVEKTIOLLA

Yksinkertaisin tapa lämmittää tilaa kompostiastialla on antaa ilmavirran kulkea kompostiastian läpi ilmaten biojätettä aerobiselle kompostoinnille sekä lämmitäten kompostiastian sijaitsevaa tilaa. Tämä sama ilma siirtää kompostiastiassa olevaa lämmintä ilmaa suhteellisesti viileämpään tilassa olevaan ilmaan.

3.1 Esimerkkikompostiastian valinta

Tutkimusten sekä arvioiden mukaan suomalaiset tuottavat keskimääräisesti 20–25 kg ruokajätettä vuodessa.¹⁷ 25 kg ruokajätteen pystyy muuttamaan jouleiksi käyttäen aikaisemmin ilmaistua ruokajätteen entalpiaa. 25 kg voi myös muuntaa tilavuuteen 0,0625 m³ eli 62,5 L käyttäen sen arvioituja tiheyksiä. Normaalit kompostiastiat, jotka on suunniteltu yhden perheen talouksiin, pyörivät tilavuuksilla 150–300 L. Tämän kokoiset astiat täyttyisivät suunnilleen kerran vuodessa yhden perheen käytössä.

Koska tässä työssä käydään läpi useita lämpövirtalaskuja, tulevat tulokset on hyvä laittaa kontekstiin, jotta niitä voi havainnollistaa paremmin. Yllä olevien tietojen perusteella 200 L vaikuttaa sopivalta kompostiastian koolta, jota voisi hyvin käyttää tulevissa esimerkkilaskuissa. Tämän kyseisen kompostiastian korkeus olisi 1,2 m sekä sen halkaisija 0,46 m eli 46 cm.

Oletetaan, että 200 L kompostiastiassa tarvitaan 75 L tyhjää tilaa ilman kiertoon sekä astiaan asennettu noin 8 L ilmaputki. Nämä laskevat kompostiastian käyttötilavuuden 117 L. Tällä tilavuudella ”täysinäisen” kompostiastian teoreettinen energiamäärä olisi noin 200 MJ. Oletetaan, että tämä energiamäärä vapautuu

¹⁷ jukuri.luke.fi, Suomen ruokajäte

koko kompostoimisen ajan tasaisesti. Oletetaan myös, että suurin osa lämpöenergiasta (90 %) vapautuu termofiilisessä vaiheessa, mikä on 2 viikkoa pitkä. Näillä tiedoilla saadaan kompostiastialle kyseinen lämpöteho:

$$P = 2 * 10^5 kJ * \frac{0,9}{(3600 * 24 * 14)s} = 0,14881 kW = 148W (1)^{18}$$

Yksi "täysinäinen" kompostiastia olisi siis teoriassa kahden viikon ajan 148 W lämmitin, jos reaktio olisi täydellinen ja kompostointiprosessi sujuisi ongelmitta. Tämä on siis tämän kyseisen kompostiastian teoreettinen teho, kun se on täytetty melkein täyteen. Tämä olettaa sen, että astia on täynnä ennen kuin kompostointiprosessi alkaa, sekä jatkuva 148 W tuotto vaatisi sen, että astian saisi täytettyä ruokajätteellä 2 viikon välein, mikä ei ole ainakaan yhdelle perheelle mahdollista, kuten kävi ilmi aikaisemmassa osiossa.

¹⁸ Seppänen, R., Mannila, L., Kervinen, M., Konttinen, P., Karkela, L., Yli-Kokko, T., . . . Kairinen, K. 2013

3.2 Simulaation parametrit

Tämä 148 W lämpövirta ei siirry taianomaisesti kompostiastiasta sen olevaan tilaan, vaan se siirtyy kolmella mahdollisella tavalla: konvektiolla, konduktiolla tai säteilyllä. Tässä osiossa pohditaan konvektiota mahdollisena tapana siirtää kompostiastiassa oleva lämpöenergia ulos siihen tilaan, missä itse astia on. Yksi tapa ajatella tätä lämmitysprosessia on pohtia sitä ilmankierron lämpöarvon kautta: aerobisessa kompostoinnissa tulee olla tarpeeksi suuri ilmavirta sen prosessin toimivuudessa, ja suhteellisesti kylmä ilma korvaa astiassa olevaa kuumaa ilmaa. Näiden kylmän ja kuuman ilman välillä on entalpiaero, mitä hyödyntämällä voidaan laskea astiasta tuleva lämpövirta muutaman arvion ja oletuksen avulla. Tämä lämpöteho voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$q = \dot{m} * (\Delta h) = \dot{m} * (h_2 - h_1) \quad (2)^{19}$$

q = lämpöenergiavirta kJ/s (kW)

$$\dot{m} = \text{massavirta} \frac{dm}{dt} = \text{kg/s}$$

$$\Delta h = \text{entalpiaero} \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Tämä on konvektion muoto, jossa kylmä ilma kulkee lämpimän alueen läpi ja ottaa lämpöenergiaa mukaansa. Toimintatapa on sama kuin lämpövuotuksella ja sen läpi kulkevalla ilmalla, mikä lämmittää samaa tilaa. Kaksi selvitettävää arvoa on: tässä kyseisessä tilanteessa oleva massavirta astian läpi, sekä sisään tulevan-, että sisällä

¹⁹ tandfonline.com, massavirtalaskujen esimerkkituloksia

olevan ilman entalpioiden erotus. Näistä kahdesta arvosta entalpia sisältää muutamman vakion, kuten ilman sekä vesihöyryn ominaislämpökapasiteetit sekä vesihöyryn höyrystymislämmön:

$$h = c_{ilma} * t + s * (c_{vesihöyry} * t + Q_h) \quad (3)^{2021}$$

$$h = \text{entalpia } \frac{kJ}{kg}$$

c = aineen ominaislämpökapasiteetti

t = lämpötila °C

Q_h = Veden höyrystymislämpö = 2501 J

s = vesihöyryn massan osuus koko kaasun massasta (kg/kg)

Kun kylmän sekä lämpimän ilman entalpiat ovat laskettu, voidaan laskea astiasta poistuvan lämpöenergian määrä astian läpi liikkuvan ilman massavirran avulla. Massavirralla tarkoitetaan sitä, kuinka paljon ainetta kulkee tietyssä ajassa kilogrammoina. Massavirta määritetään kyseisellä kaavalla:

$$\dot{m} = \frac{V * \rho}{t} = \rho * A * v \quad (4)^{22}$$

$$\dot{m} = \text{massavirta } \frac{kg}{s}$$

v = nopeus

$$\rho = \text{tiheys } \frac{kg}{m^3}$$

V = tilavuus m^3

²⁰ engineeringtoolbox.com, kostean sekä kuivan ilman entalpia

²¹ engineeringtoolbox.com, suhteellinen ilmankosteus

²² Mäkelä, M., Öistämö, J., Soininen, L. & Tuomola, S. 2008

A = pinta-ala m^2

t = aika s

Tämä simulaatio on suunniteltu yllä mainitun kaavan ympärille:

$$q = \dot{m} * (\Delta h) \quad (2)$$

Simulaatiossa olevat ilmanpaineet simuloidaan käyttäen kuivan ilman sekä vesihöyryn osapaineita. Näiden osapaineiden kautta saa myös laskettua kyseisen ilman tiheyden käyttäen vakioita, mitkä löytyvät viittauksessa 23:

$$p_{vesihöyry} = \left(6,1078 * 10^{\frac{T*7,5}{T+237,3}} \right) * Rh \quad (5)^{23}$$

$p_{vesihöyry}$ = veden osapaine Pa

Rh = suhteellinen ilmankosteus %

T = lämpötila °C

$$p_{ilma} = p_{atm} - p_{vesihöyry} \quad (6)^{24}$$

p_{atm} = ilmanpaine = 101325 Pa

Näiden osapaineiden kautta saadaan laskettua ilman tiheys:

²³ omnicalculator.com, kostean ilman osapaineet

²⁴ omnicalculator.com, kostean ilman osapaineet

$$\rho = \left(\frac{p_{ilma}}{R_{ilma} * (T + 273,15)} \right) + \left(\frac{p_{vesihöyry}}{R_{vesihöyry} * (T + 273,15)} \right) \quad (7)^{25}$$

$$R_{ilma} = 287,05 \text{ J/kg} \cdot \text{k}$$

$$R_{vesihöyry} = 461,495 \text{ J/kg} \cdot \text{k}$$

Ilman tiheyden kautta saadaan selvitettyä tunnetussa tilassa olevan ilman massa, minkä kautta saadaan selville nostevoiman sekä painovoiman netto, mikä syntyy astiassa olevan ilman sekä huoneessa olevan ilman tiheyserosta:

$$F_{netto} = F_{noste} - F_{painovoima} = \rho_{huone} * V_{astia} * g - \rho_{astia} * V_{astia} * g \quad (8)^{26,27}$$

$$F = \text{voima N} = \text{kg} \cdot \text{m/s}^2$$

$$g = \text{painovoima} \approx 9,81 \text{ m/s}^2$$

Tämä on se voima, millä astiassa oleva tiheydeltänsä pienempi ilma nousee ylöspäin sekä ulos astiasta. Nopeus, millä tämä ilma kulkee, saadaan selville seuraavalla kaavalla:

$$v^2 = u^2 + 2 * a * x \quad (9)^{28}$$

²⁵ omnicalculator.com, kostean ilman osapaineet

²⁶ Inkinen, P., Tuohi, J. & Tuohi, T. 2002

²⁷ scienceline.ucsb.edu, lämmin ilma nousee

²⁸ Mäkelä, M., Öistämö, J., Soininen, L. & Tuomola, S. 2008

$v, u = \text{nopeus m/s}$

$x = \text{vapaan ilmatilan korkeus m}$

$a = \text{kiikhtyvvyys m/s}^2$

Oletetaan, että alkunopeus u on 0, sillä ilman tulee ensiksi päästä ruokajätteen läpi. mikä ei anna sille hyvää tilaa kiihtyä, sekä ei ole vielä halutussa lämpötilassa, mitä aikaisemmat laskut käyttävät. Muutetaan myös kiihtyvvyys a ennalta tiedettyihin suureisiin voima F sekä massa m osamäärään hyödyntäen Newtonin toista lakia:

$$F = m * a \Rightarrow a = \frac{F}{m} \quad (10)^{29}$$

\Rightarrow

$$v = \sqrt{2 * \frac{F}{m} * x} \quad (11)$$

Tämä nopeus muutetaan samaan pinta-alaan, missä ilman massavirta lasketaan:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{A_1}{A_2} \Rightarrow v_2 = \frac{A_1 v_1}{A_2} \quad (12)^{30}$$

Esimerkkikompostiastiassa oli 75 L lämmitettävää ilmatilaa. Tästä voidaan ratkaista tämän tilan korkeus, mitä tarvitaan kaavassa 11:

$$x = \frac{0,075m^3}{\pi * 0,23m^2} = 0,45129m \approx 0,45m \quad (13)$$

²⁹ Inkinen, P., Tuohi, J. & Tuohi, T. 2002

³⁰ Inkinen, P., Tuohi, J. & Tuohi, T. 2002

Näillä arvoilla saadaan laskettua kompostiastian läpi kulkevan ilman massavirta, mikä on ensimmäinen osio tässä kaavassa (kaava 4). Huoneen sekä astian ilman entalpia on paljon yksinkertaisempi selvittää, kuten se on selitetty ylemmässä kapaleessa:

$$h = c_{ilma} * T + s * (c_{vesihöyry} * T + Q_h) \quad (3)$$

Astian sekä huoneen ilman entalpiat selvitetään sekä niiden erotus lasketaan:

$$\Delta h = |h_2 - h_1| \quad (14)^{31}$$

Tämän jälkeen meillä on kaikki tarvittavat arvot lämpöenergiavirran laskemiseen.

Tähän lämpövirtaan liittyy kolme suurta muuttujaa, mitkä vaikuttavat sen tehokkuuteen: lämpötilaero, kosteus sekä ilman massavirta. Näistä alla olevista kuvajista näkee, kuinka voimakkaasti mikäkin näistä muuttujista vaikuttaa tähän prosessiin. Seuraavassa simulaatiossa tutkitaan näiden eri muuttujien vaikutusta toisiinsa nähden, jotta saadaan selville niiden tärkeyshierarkia lämpötehon vaikutukseen liittyen. Tässä simulaatiossa oletetaan, että 5 m*5 m*5 m (125 000 L) huoneessa on 200 L astia, mikä on 125 L täytetty, jättäen 75 L tilaa vapaaksi ilmalle. Alkuperäisiksi arvoiksi on asetettu huoneen lämpötila 15°C 30 % ilmankosteudella. Sisätilan huoneiden normaali ilmankosteus on yleensä väleillä 30–50 % sekä 15°C lämpötila asetettiin, sillä vaikka se on normaalia viileämmän huoneen lämpötila, kompostiastia todella luultavasti ei pidetä normaaleissa oleskelutiloissa, vaan sellaisissa tiloissa kuten autotalli tai verstaas, mitkä yleensä ovat hieman viileämpiä. Astian lämpötila on 65°C 99 % ilmankosteudella. Kompostiastian ilmavirta-aukko-

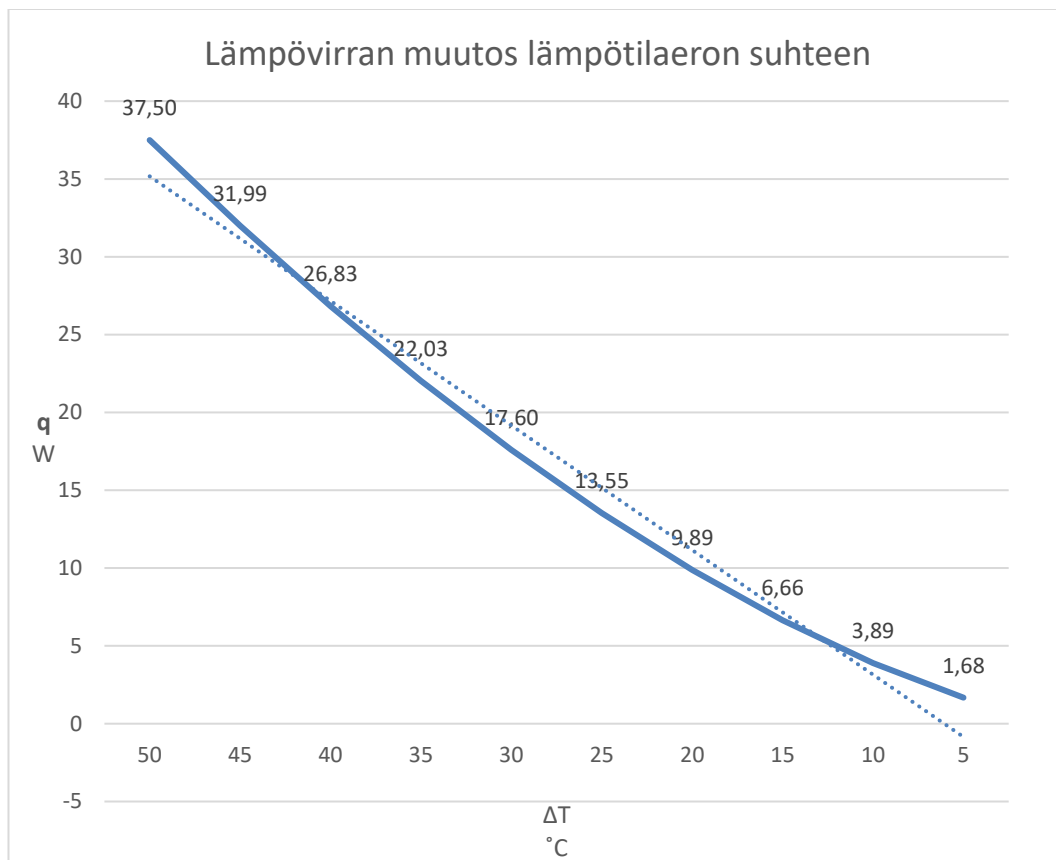
³¹ Inkinen, P., Tuohi, J. & Tuohi, T. 2002

jen yhteispinta-ala on vakiona $314,2 \text{ cm}^2$, mitä voisi kuvitella olevan 20 cm halkaisijalta oleva putki. Tämä pinta-ala johtuu siitä, että kompostiastian pohjassa sekä kannessa on pinta-alaltaan yhteensä $314,2 \text{ cm}^2$ olevat ilma-aukot.

Ne muuttujat, mihinkä tässä simulaatiossa pystyy vaikuttamaan vapaasti ovat tilojen lämpötilat ja kosteudet sekä astiaan pääsevän ilma-aukkojen yhteispinta-ala, mikä vaikuttaa massavirtaan. Kaikki muut arvot pystytään laskemaan muiden vakioiden ja näiden asetettujen arvojen pohjalta. Otetaan myös huomioon se, että nämä tulokset eivät ole realistisia. Tämän simulaation tarkoitus on pelkästään selvittää eri parametrien vaikutuksen laajuus lämpöenergian virtaukseen.

3.3 Huoneen sekä astian lämpötilaero

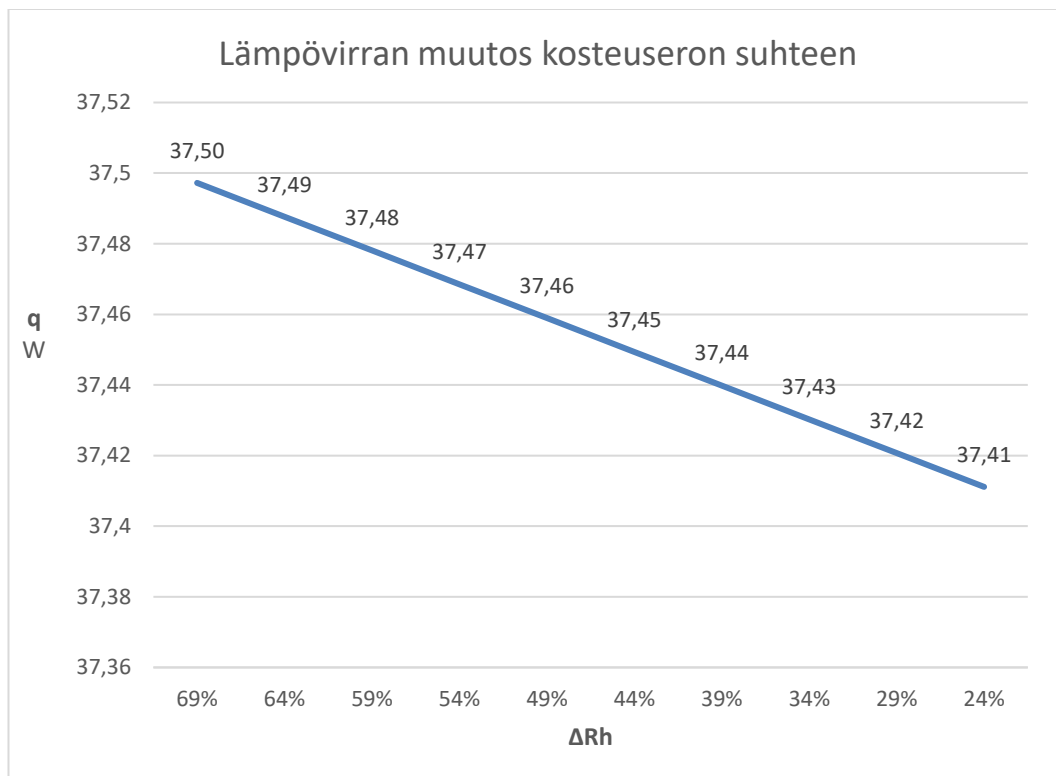
Tämä simulaatio aloitettiin vakioarvoilla ($\Delta T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta \text{Rh} = 69\%$, $A = 314,2 \text{ cm}^2$). Huoneen lämpötilaa nostettiin $5 \text{ }^\circ\text{C}$ askeleissa ylöspäin, vähentäen lämpötilojen eron suuruutta (ΔT).

Taulukko 1. Lämpövirran muutos lämpötilaeron suhteen.

Taulukossa 1 nähdään, että lämpötilaeron vaikutus lämpöenergian virtaukseen on $4 \text{ W}/5 \text{ }^\circ\text{C}$ ($0,8 \text{ W W}/^\circ\text{C}$), kun ΔT on välillä $50 \text{ }^\circ\text{C}$ – $5 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.4 Huoneen sekä astian kosteusero

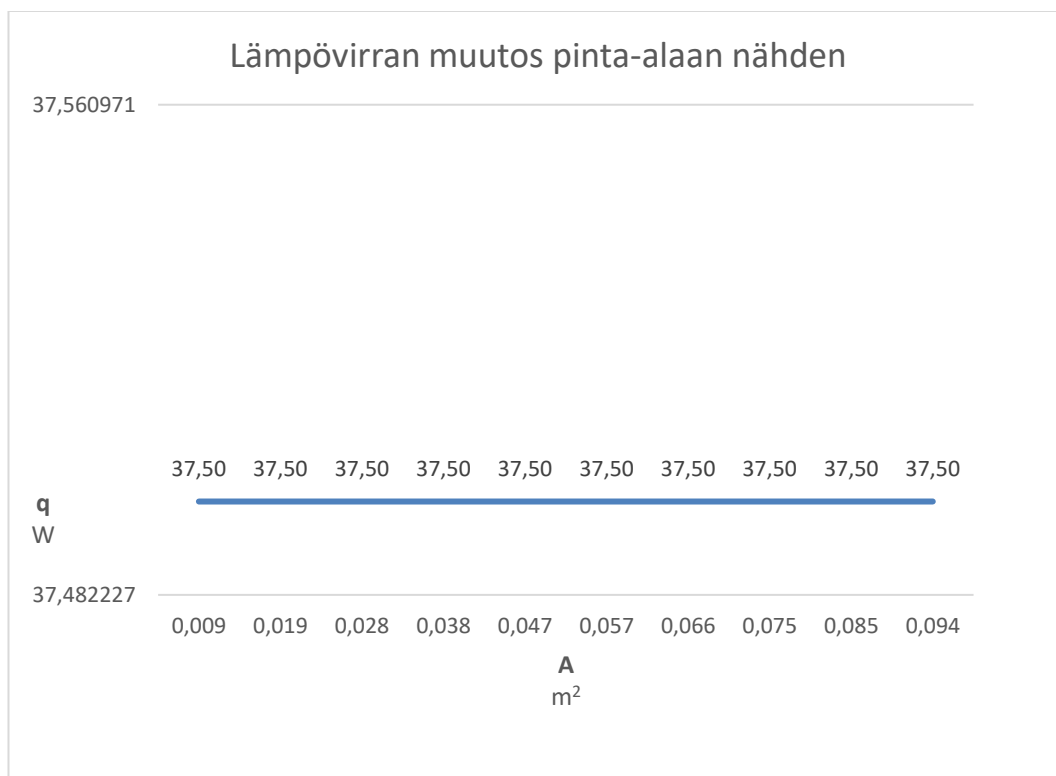
Tämä simulaatio aloitettiin vakioarvoilla ($\Delta T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta Rh = 69\%$, $A = 314,2 \text{ cm}^2$), minkä jälkeen huoneen ilmankosteutta nostettiin 5% askelissa ylöspäin, vähentäen ilmankosteuksien eron suuruutta (ΔRh).

Taulukko 2. Lämpövirran muutos kosteuseron suhteen.

Taulukossa 2 nähdään, että kosteuseron vaikutus lämpöenergian virtaukseen on $9,60 \text{ mW}/5 \% \Delta Rh$ ($1,92 \text{ mW}/\Delta Rh$), kun kosteusero on välillä 24 %–69 %.

3.5 Massavirta sekä pinta-ala

Tätä simulaatiota ei ole aloitettu täysin vakioarvoilla: $\Delta T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta Rh = 69 \%$ - sama kuin muiden simulaatioiden aloitusarvo. Massavirtaan vaikuttava muuttuja A on kahdessa aikaisemmassa simulaatiossa $314,2 \text{ cm}^2$, mutta tässä simulaatiossa alkaa $94,25 \text{ cm}^2$, sekä nousee saman verran joka askeleella.

Taulukko 3. Lämpövirran muutos pinta-alan suhteen.

Taulukossa 3 nähdään, että pinta-alan muutoksella ei ole tässä simulaatiossa vaikutusta lämpövirtaan. Tästä asiasta kerrotaan myöhemmin lisää.

3.6 Päätelmät

Kun tämän simulaation tulokset laitetaan rinnakkain, niin nähdään näiden eri tekijöiden suuruudet toisiinsa verrattuna helposti.

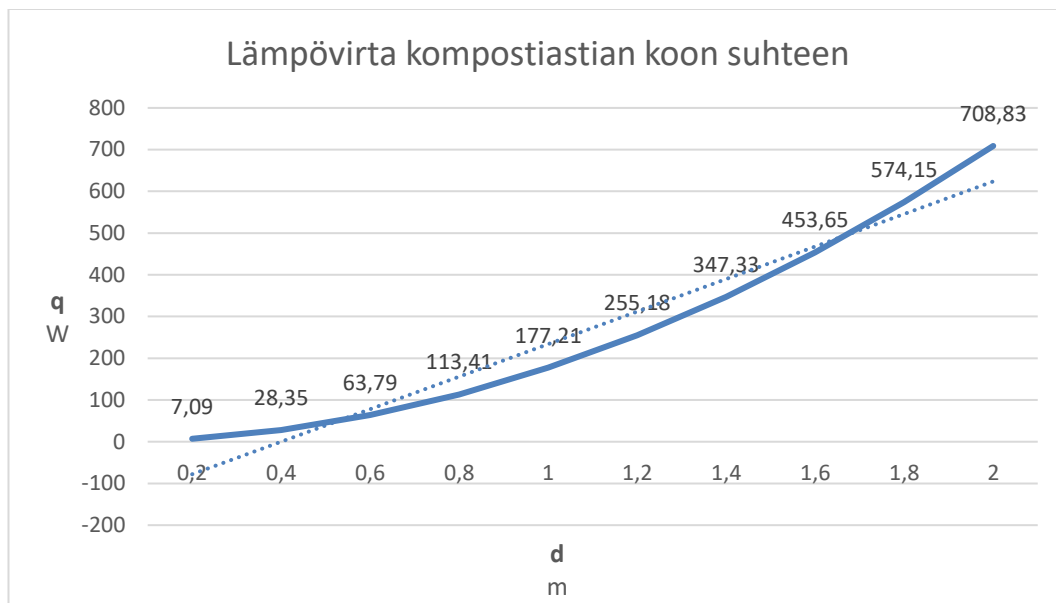
Taulukko 4. Simulaation tulokset.

Suure	Vaikutus
Lämpötila	0,8 W/ °C
Kosteus	1,92 mW/ %Rh
Pinta-ala	n/a

Taulukkoon 4 on listattu simulaatioista saadut tulokset, mistä näkee, että suurin tekijä energian siirtymisessä näyttäisi olevan huoneen sekä astian välinen lämpötilaero. Tämä on järkevä lopputulos, sillä tässä simulaatiossa lämpöenergian siirtyminen tapahtuu ilmassaan sitoutuneen lämpöenergian kautta, ja astian läpi kulkeva ilma on se komponentti, joka suorittaa energian siirtymisen. Suuremmilla lämpötilaeroilla tiheysero kasvaa, mikä tuottaa enemmän nostetta astiassa olevalle ilmalle. Ilmankosteus vaikuttaa hieman enemmän energian siirtymisessä lämpötilaan verrattuna vesihöyryn suuremman ominaislämpökapasiteetin sekä pienemmän tiheyden kannalta.

Vaikka kaavasta 4 näkee, että pinta-alalla on suora vaikutus massavirtaan, mikä vaikuttaa lämpövirran suuruuteen, pinta-alaa vaihtamalla lopullinen lämpövirta ei muutu. Tämä johtuu siitä, koska ilmavirran nopeuteen vaikuttava tekijä on lämpötilaero, mikä syntyy astian sisällä. Tähän ilmavirta-aukkojen pinta-ala ei vaikuta suoraan, sillä sisään tulevan ilman tarkoitus on tuoda happea aerobista kompostointia varten, ei varsinaisesti siirtää tätä lämmintä ilmaa eteenpäin. Mutta ilmavirta-aukkojen pinta-ala on silti tärkeä komponentti koko prosessissa, sillä ilman hyviä ilmateitä sekä tarpeeksi hyvää ruokajätteen hapettamista aerobinen kompostointi ei olisi mahdollista. Jotta saataisiin paras lämpövirta ulos kompostiastiasta passiivisella konvektiolla eli konvektiolla ilman ilmapumppuja tai muita apuja, tulee lämpötilaeron olla mahdollisimman suuri.

Suurempia lämpövirtoja saadaan myös kasvattamalla kompostiastian vapaata ilmatilaa sekä astian kokoa ylipäättänsä. Mitä enemmän kompostiastiassa on lämpenevää ilmaa, mikä siirtyy konvektiolla ulos astiasta, sitä enemmän se tila, missä kompostia on, lämpenee. Seuraavassa kuvaajassa näytetään tämä kyseinen vaikutus. Lämpötilaero pidettiin 50 °C sekä kosteusero 69 %. Aikaisemmin käytetyn vapaan ilmatilan korkeus oli 0,45 m, niin tätä arvoa käytetään tässäkin simulaatiossa, muutettava arvo on kompostiastian halkaisija. Aluksi halkaisijaksi asetetaan 0,2 m ja tätä arvoa nostetaan 0,2 m jokaisella askeleella.

Taulukko 5. Lämpövirran muutos säilön halkaisijan suhteen

Taulukossa 5 nähdään, että lämpövirran muutos alkaa kasvamaan eksponentiaalisesti. Keskimääräisesti lämpövirta nousi 78 W/ 0,2 m, kun kompostiastian halkaisija on väleillä 0,2 m–2 m. Huomioidaan myös, että suuremmilla kompostiastian halkaisijoilla tulee myös kompostiastian tilavuuden olla tarpeeksi suuri, jotta tuotettu lämpövirta on tarpeeksi suuri hyvän kompostoinnin ylläpitämiseksi.

Näissä simulaatioissa ei ole otettu huomioon ilmavirran mahdollista vaikutusta hajottajien toimintanopeuteen, ja on oletettu kompostointiprosessin olevan täydellinen. On mahdollista, että suuremmat ilmavirrat nostattavat hajottajien aineenvaihduntaa, mikä kasvattaa kompostiastian potentiaalista lämpötehoa korkeammilla ilmavirroilla. Päinvastainen ilmiö on myös mahdollista, missä liian vähäinen ilmavirta hidastaa hajottajien aineenvaihduntaa, alentaen kompostiastian lämmöntuottoa. Ilmavirran vaikutus hajottajien kompostointitehokkuuteen tarvitsee oman tutkimustyön, missä verrataan ilmavirran vaikutusta kompostiastiaan syntyvään lämmön määrään. Tämän tutkimuksen pohjalta saisi parempaa tietoa hyvästä ilmavirran vaikutuksesta kompostiastian lämmöntuotantoon.

4 LÄMMÖN SIIRTÄMINEN KOMPOSTIASTIASTA

Sen sijaan, että kompostiastian tuottama lämpöenergia päästettäisiin suoraan siihen tilaan, missä tämä kyseinen astia on, tämän lämpöenergian talteenotto on myös mahdollista. Kompostiastian tuottama lämpöenergia voidaan varastoida lämmönvesivaraajiin samalla lailla kuin taloissa on lämminvesivaraajia lämpimän veden nopeisiin tarpeisiin. Ottaen huomioon aikaisemman kappaleen teoreettinen 140 W lämpöteho, tuotettu lämpömäärä ei ole suuri, joten tämän talteen otetun lämmön käyttökohteet voisivat olla esimerkiksi pienmuotoinen lattianlämmitys, mihinkä ei edes välttämättä tarvitse lämminvesivaraajaa.

Jos halutaan ottaa kompostiastiasta tuleva lämpöenergia talteen, tämä suoritettaisiin konduktiolla, mikä tapahtuu lämpöenergiaa liikuttavien nesteiden ja jonkin väliaineen välillä. Tässä kyseisessä tutkimustyössä käytetään myös konvektiota hyväksi saadaksemme lämpöenergian pois kompostiastiasta.³²

Konvektiolla siirretyn lämpöenergian määrä voidaan selvittää kyseisellä kaavalla:

$$Q = h * A * \Delta T \quad (15)^{33}$$

Q = Lämpöenergia J

h = konvektion lämmönsiirtokerroin

A = pinta-ala m²

ΔT = lämpötilaero °C

Konvektion lämmönsiirtokerroin vaatii lämpövuon, mikä vaatii lämpövirran:

³² Energyeducation.ca, konvektion perusteet

³³ Mäkelä, M., Öistämö, J., Soininen, L. & Tuomola, S. 2008

$$h = \frac{q}{\Delta T} \quad (16)^{34}$$

q = lämpövuoto W/m^2

$$q = \frac{\Phi}{A} \quad (17)^{35}$$

Φ = Lämpövirta (konduktio)

Tämä tarkoittaa sitä, että ennen kuin lämpöenergia on siirtoputkissa tai varaa-
jassa, lämpöenergia siirtyy astiasta putkeen tai varaaajaan konduktion eli johtumi-
sen kautta:

$$\Phi = -\lambda * A * \frac{\Delta T}{d} \quad (18)^{36}$$

λ = lämmönjohtavuus $W/m*k$

d = aineen paksuus m

Huomioidaan myös se, että lämmönjohtavuus λ merkitään yleensä negatiiviseksi,
kuten tässä esimerkissä, sillä lämpöenergian virran suunta on päinvastainen kas-
vavaan lämpövirtaan nähden. Joissain tapauksissa tämä on tärkeää, mutta me tie-
dämme, että lämpövirran suunta on aina yksisuuntainen, joten tämä ei ole tässä
tapauksessa pakollista.

³⁴ Mäkelä, M., Öistämö, J., Soininen, L. & Tuomola, S. 2008

³⁵ Mäkelä, M., Öistämö, J., Soininen, L. & Tuomola, S. 2008

³⁶ Mäkelä, M., Öistämö, J., Soininen, L. & Tuomola, S. 2008

4.1 Materiaali

Konduktiossa, eli epäsuorasti konvektiossa, johtumismateriaalin lämmönjohtavuus on tärkeässä asemassa. Seuraavassa taulukossa on erilaisten aineiden lämmönjohtavuuksia sekä hintoja, jotta saadaan selvitettyä aineiden sopivuushierarkia tähän lämmönsiirtotyöhön.

Taulukko 6. Eri materiaalien lämmönjohtavuuksia.

Alkuaine	Lämmönjohtavuus W/m ²	hinta €/ 1 000 kg	Hinta/johtavuus - suhde
Alumiini	237 ³⁷	3287,5 ³⁸	7,21*10 ⁻²
Kupari	400	10 165	3,94*10 ⁻²
PVC-muovi	0,25 ³⁹	700	3,57*10 ⁻⁴

Taulukon 6 tuloksista huolimatta yleisesti ajatellaan, että näistä johdemateriaaleista kupari on paras vaihtoehto lämmönjohtavuuden suhteen. Vaikka hopealla on suurempi lämmönjohtavuus kupariin verrattuna (429 W/m²), hopea on jalometalli sekä paljon harvinaisempi kuin kupari, joten sen hinta kilogrammaa kohden on paljon suurempi. Kuparin korkea lämmönjohtavuus, helppo saatavuus, suhteellisesti matala hinta sekä helppo työstettävyys tekee siitä parhaan valinnan lämmönsiirtämisessä. Tämä tulos näkyy LVI-tuotteissa lämminvesivaraajissa sekä siihen liitetyssä lämmönsiirtoputkistossa, missä kupari on yleinen valinta. Timantti

³⁷ muropaketti.com, materiaalien lämmönjohtavuuksia

³⁸ lme.com, metallien hintoja

³⁹ ctherm.com, muovien lämmönjohtavuuksia

olisi ylivoimaisesti paras materiaali lämmönsiirtoon (1000 W/ m^2)⁴⁰, mutta sen korkea hinta ja huono työstettävyys tekevät siitä harvinaisen valinnan. Alumiinilla on paras hinta/lämmönjohtavuussuhde, sillä se on paljon halvempaa kupariin verrattuna. Alumiinia olisi myös mahdollista käyttää kuparin sijasta, sillä kompostastian tuottama lämpömäärä ei ole tarpeeksi suuri, jotta lämmönjohtamistehon suuruus olisi ongelma. Muovi itsessään ei toimi hyvänä lämmönjohtomateriaalina sen todella pienen lämmönjohtavuuden takia.⁴¹

Käyttäen kuparia johdemateriaalina voidaan laskea turvallinen pinta-ala 140 W lämpövirralle muokkaamalla yllä olevaa kaavaa (18):

$$A = \frac{\Phi * d}{\Delta T * \lambda} \quad (19)$$

$$A = \frac{140 \text{ W} * 0,005}{50^\circ \text{C} * 400 \text{ W/m} * ^\circ \text{C}}$$

Käyttäen aikaisempaa suurinta lämpötilaeroa ($50 \text{ }^\circ\text{C}$) voidaan laskea, että turvallinen pinta-ala on $0,000035 \text{ m}^2$, $0,35 \text{ cm}^2$. Tällä kontaktipinta-alalla 140 W lämpötehoa tuottava kompostiaastia ei viilene eikä sen kompostointiprosessi hidastu. Jos käytettäisiin kuparin sijasta alumiinia, turvallinen pinta-ala nousee $0,35 \text{ cm}^2$ $0,59 \text{ cm}^2$.

4.2 Järkevät etäisyydet

Jos lämminvesivaraaja ei ole suorassa kontaktissa kompostiaastiaan, niin lämpövirta lämminvesivaraajaan tulee luultavimmin putkien kautta. Tässä ainoa järkevä ratkaisu olisi se, että lämminvesivaraajasta kulkee putki kompostiaastian lämmönsiirtopinnan läpi, jotta kompostiaastian ja lämminvesivaraajan välillä ei olisi kaksi

⁴⁰ muropaketti.com, materiaalien lämmönjohtavuuksia

⁴¹ ctherm.com, muovien lämmönjohtavuuksia

johtumisvaihetta, sillä tämä laskisi tehokkuutta entistä enemmän. Lämminvesivaraajan pystyy asentamaan suoraan kompostiastian päälle, jättäen niiden väliin kuparipohjan, jonka kautta kompostiastiasta nouseva vesihöyry on suorassa kontaktissa kupariin, minkä läpi lämpöenergia pystyy siirtymään lämminvesivaraajaan. Vesiputkia käyttäen kontaktin mahdollinen pinta-ala tulee olemaan pienempi, ellei suunnittele putkiston kulkemaan monta kierrosta kompostiastian ”kanneissa”, nostaen kontaktin pinta-ala. Tämä ei tosin tule olemaan ongelma, sillä kompostiastian lämpöteho on niin pieni. Toinen huonompi komponentti putkien käytössä on siinä, että putkistot itsessään kasvattavat lämpöenergian häviötä hyvilläkin eristeillä. Positiivinen puoli putkien käytössä on se, että lämminvesivaraajan sijainnin voi päättää vapaammin sen sijaan, että se istuisi kompostiastian päällä.

Vesiputkien lämpöhäviöihin vaikuttaa muutama arvo: eriste, putken koko ja paksaus sekä putken pituus:

$$Q = 2 * \pi * \lambda * \frac{l * \Delta T}{\ln\left(\frac{d2}{d1}\right)} \quad (20)^{42}$$

l = putken pituus m

λ = lämmönjohtavuus W/m²*°C

$d2$ = eriste kerroksen ulkohalkaisija m

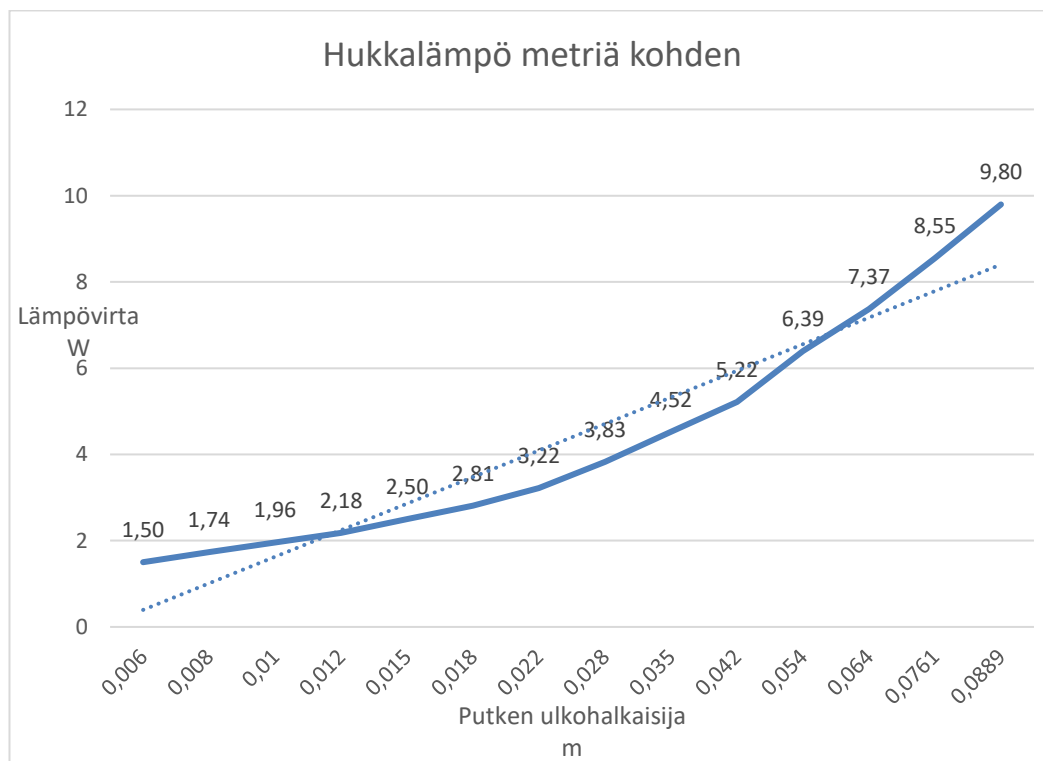
$d1$ = putken ulkohalkaisija m

Pystyy myös asettamaan $d2$ -kupariputken ulkohalkaisijaksi sekä $d1$ -putken sisähalkaisijaksi, jotta näkee kuinka paljon suojaamaton putki päästää hukkalämpöä.

⁴² Inkinen, P., Tuohi, J. & Tuohi, T. 2002

Seuraavassa taulukossa on erikokoisten putkien⁴³ hukkalämpötaasoja, kun käytetään helposti saatavan eristeen⁴⁴ arvoja. Pituus on 1 m, lämpöero on 10 °C, eristeen paksuus putken ympärillä on 13 mm sekä sen lämmönjohtavuus on 0,04 W/m²*°C:

Taulukko 7. Eri kokoisten putkien hukkalämpö metriä kohden.



Taulukosta 6 nähdään, että putken halkaisijan kasvaessa hukkalämmön määrä alkaa kasvamaan eksponentiaalisesti. Hukkalämmön kasvukerroin on pienempi kuin 1 (0,6161) tarkoittaen sitä, että hukkalämmön häviösuhte putken kasvusuhdetta

⁴³ kupari.com, kupariputkien yleisiä kokoja

⁴⁴ biltema.fi, putkieristeen lämmönjohtavuus

kohden on pienempi halkaisijavälillä 6–88,9 mm, joten putken halkaisijaa kasvatamalla suhteelliset häviöt pienenevät. Tosin samalla, kun putkien tilavuus kasvaa, niin siellä olevan veden lämmittämiseen tarvitaan enemmän energiaa.

Jos haluaa minimoida hukkalämpöä putkia käyttäessä, niin 6 mm on paras vaihtoehto. Pienilläkin paine-eroilla vesi liikkuu putkiston ja vesivaraajan välillä siirtäen kylmempää vettä lämpökontaktin kohdalle sekä lämmintä vettä varaajaan.

Näitä paine-eroja ei pysty tarkasti arvioimaan ideaalikaasu -kaavalla, sillä se ei toimi pienillä lämpötiloilla tai suurilla paineilla.⁴⁵ Tosin 140 W verran lämpövirtaa pääsee liikkumaan pienilläkin paine-eroilla:

$$\Phi = \sqrt{\frac{2 * \Delta p}{\rho}} * \rho * A * c_{vesi} * \Delta T \quad (21)^{46}$$

$$140W = \sqrt{\frac{2 * 13,8485pa}{999 kg/m^3}} * 999 kg/m^3 * (\pi * (0,008m)^2) * 4186 J/kg * 1^{\circ}C$$

8 mm sisähalkaisijan kokoisella putkella 140 W lämpövirtaan pääsee noin 14 Pascalin paine-erolla, kun lämpötilaero on 1 °C.

Joka tapauksessa kompostiastian ei voi lisätä orgaanista jätettä kannen kautta, sillä kantta ei ole tällaisessa suunnittelussa. Luukku olisi astian kyljessä, mikä hankaloittaa hieman kompostiastian täyttämistä.

⁴⁵ thegreatcoursesdaily.com, ideaalikaasun tilayhtälön heikkous

⁴⁶ Mäkelä, M., Öistämö, J., Soininen, L. & Tuomola, S. 2008

5 KÄYTTÖVAIHTOEHTOJA

Tällainen kompostiastia toimii periaatteessa lämpöpatterina, mikä lämmittää vettä höyryksi. Se miten tätä höyryä käytetään, riippuu luovuudesta sekä käyttökohteesta. Tässä työssä on käsitelty jo kaksi tapaa, mitkä ovat luultavasti yleisimpiä tapoja saada kompostiastiasta saatava lämpö käyttöön. Seuraavissa kappaleissa käydään läpi näiden menetelmien hyviä ja huonoja puolia.

5.1 Lämpöenergia suoraan sisätilaan

Kuten simulaatiossa laskettiin, kompostiastian läpi menevä ilmavirta siirtää samalla lämpöenergiaa ulos suhteellisesti lämpimämmästä astiasta viileämpään ympäristöön. Tässä menetelmässä hyvä puoli on se, että lämmönsiirrossa ei ole yhtään ylimääräisiä välivaiheita, joten hukkalämpö on minimoitu. Jos lämpöä siirretäisiin säiliöstä toiseen putkien kautta, lämmönsiirron tehokkuus pienenee sekä syntyy hukkalämpöä, jos on tarkoituksena käyttää lämpöä eri huoneessa kuin, missä itse astia on.

Tässä suurin ongelma on kosteus – siis kosteuden karkaaminen astiasta huoneeseen astian läpi virtaavan ilman mukana. Kompostiprosessi vaatii korkean kosteuden sekä suuren määrän vettä, sillä bakteerit sijaitsevat näillä vetisillä pinnoilla. Yleensä, kun kosteutta yritetään hallita, niin käytetään jonkinlaisia materiaaleja, kuten silikonikristalleja sekä suoloja⁴⁷, mutta vaikka tällaiset materiaalit imisivätkin kosteutta itseensä, ne eivät vapauta sitä takaisin astiaan.

5.2 Putkilla lämpövaraajaan

Kuten käytiin jo läpi kappaleessa 4, on mahdollista ottaa kompostiastiassa syntyvä lämpöenergia talteen lämminvesivaraajaan. Tuloksista kuitenkin näkee, että tässä

⁴⁷ Sciencedirect.com, ilmankosteuden vähentäminen

työssä käytetyn kompostiastian lämmitysteho on todella pieni, joten lämminvesivaraajan lämmön ylläpitäminen pelkästään kompostiastian toiminnalla vaatii todella suuren astian: pienimmissäkin lämminvesivaraajissa on vähintään 1 kW lämmittimen kytkettynä kiinni. Jotta saataisiin kompostiastiasta teoriassa 1 kW tehoinen astia, sen tulisi saada noin 20 kg ruokajätettä päivässä. 20 kg päivässä eli 420 kg kolmessa viikossa tarkoittaisi vähintään 1 000 L kokoista kompostiastiaa, jotta se pystyisi tuottamaan lämpötehoa tarpeeksi nopeasti päästäkseen 1 000 W lämpövirtaan.

Toinen huono puoli tässä tavassa on se, että lämminvesivaraajan tulisi olla suorassa kontaktissa kompostiastian kanssa tai muuten kärsiä suhteellisesti suuria hukkalämpöjä, mitä johtuu pois kupariputkien sekä niiden eristeiden läpi.

5.3 Lämpösähköinen generaattori

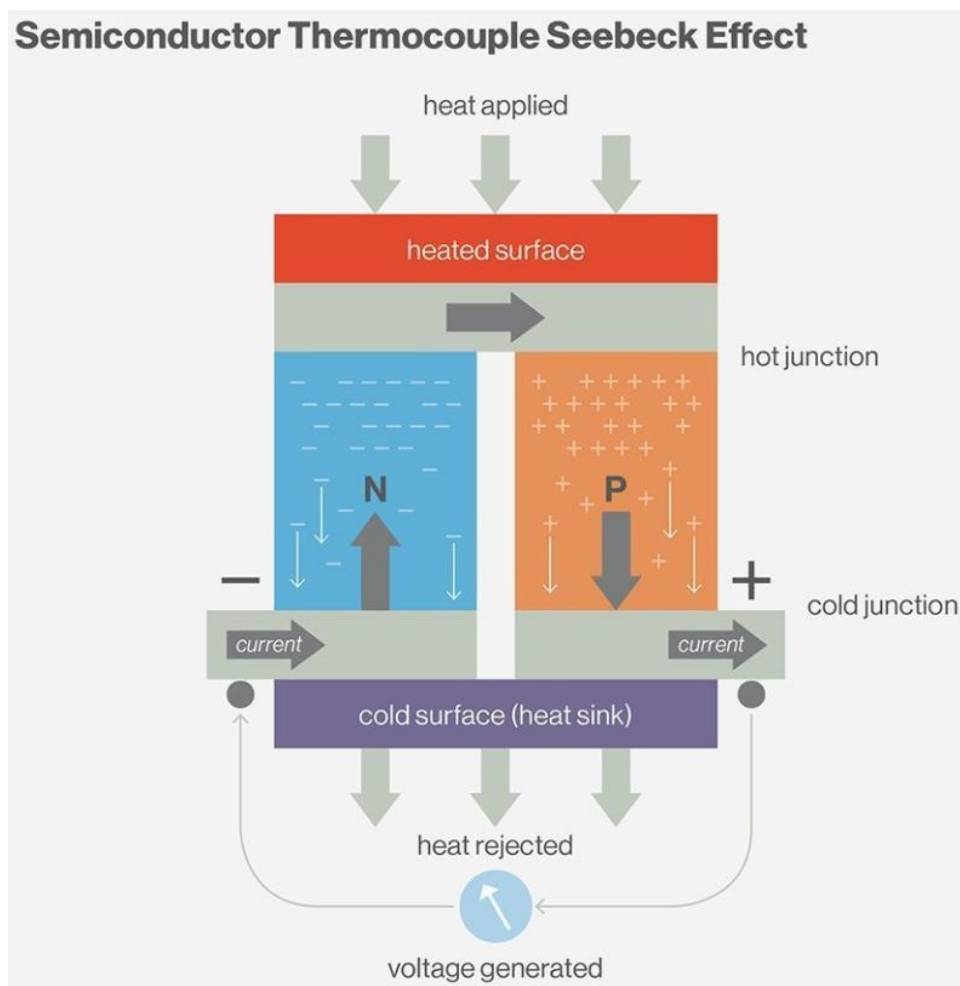
Yksi erikoisempi vaihtoehto on hyödyntää lämpösähköilmiötä⁴⁸ ja tuottaa sähköä käyttämällä kompostiastian sekä astian sijainnin lämpötilaeroa. Tämä ilmiö syntyy, kun kahden eri materiaaleista olevien johtimien päiden välille syntyy lämpötilaero, ja molemmat johtimet ovat samassa suljetussa verkkopiirissä, täten niiden välille syntyy jännite-ero. Karkea kaava tälle ilmiölle on:

$$V = S * \Delta T \quad (22)^{49}$$

S = materiaaleista johtuva suhteellisuusmuuttuja

⁴⁸ instrumentationtools.com, lämpösähköilmiön perusteet

⁴⁹ instrumentationtools.com, lämpösähköilmiön perusteet



Kuva 1. lämpösähköilmiö eli Seebeckin ilmiö. Kuva: cdn.ttgtmedia.com

Suhteellisuusmuuttuja tosiaan on riippuvainen materiaaleista, mitä käytetään. Suhteellisuusmuuttujan saa selvitettyä, kun vähentää kahdesta eri metallista tai metalliyhdisteistä niiden omat suhteellisuusmuuttujat, joiden arvot ovat yleensä välillä $300\text{--}900 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Harvinaisimmat puolijohteet ovat tähän tarkasti räätälöityjä ja pääsevät jopa lähes $\pm 1,4\text{--}2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. Yleisimmät lämpöparit ovat kuitenkin me-

tallista tehty, sillä ne ovat halvimpia. Kaikista yleisin lämpöpari on kupari-konstantaani, minkä suhteellisuusmuuttuja on noin $40 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$.⁵⁰ Konstantaani on 55 % kuparia sekä 45 % nikkeliä.

Yksittäinen lämpöpari ei tuota niin suurta jännitettä (50 °C lämpötilaerolla 2 mV jännite), mutta kun useampi näitä lämpöpareja yhdistetään sarjaan, saadaan korkeampi jännite jokaista astetta kohden. Jotta saataisiin 12 V jännite 10 °C lämpötilaerolla tarvitaan 30 000 lämpöpariyksikköä, mikä on todella paljon. Tätä määrää saa pienemmäksi suurentamalla kompostiastian sekä astian sijaitsevan tilan lämpötilaeroa. Suurella lämpötilaerolla (50 °C) tarvitaan 6 000 lämpöpariyksikköä sarjaan kytkettynä, jotta päästäisiin 12 V jännitteeseen. Tästä voi päätellä, että jos haluttaisiin päästä 12 V jännitteeseen näillä lämpötilaeroilla, tulisi panostaa hie-man kalliimpiin lämpöpareihin. Seleenistä tehty puolijohde on mitattu pääsevän $900 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ sekä germaniumista tehdyn puolijohteen $300 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$, mikä johtaa suhteellisuusmuuttujan $600 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$, mikä on 15-kertainen kupari-konstantaani lämpöpariin. Tämä nostaisi optimin 6 000 lämpöparimäärän 400 lämpöpariin, mikä kuulostaa paljon realistisemmalta.

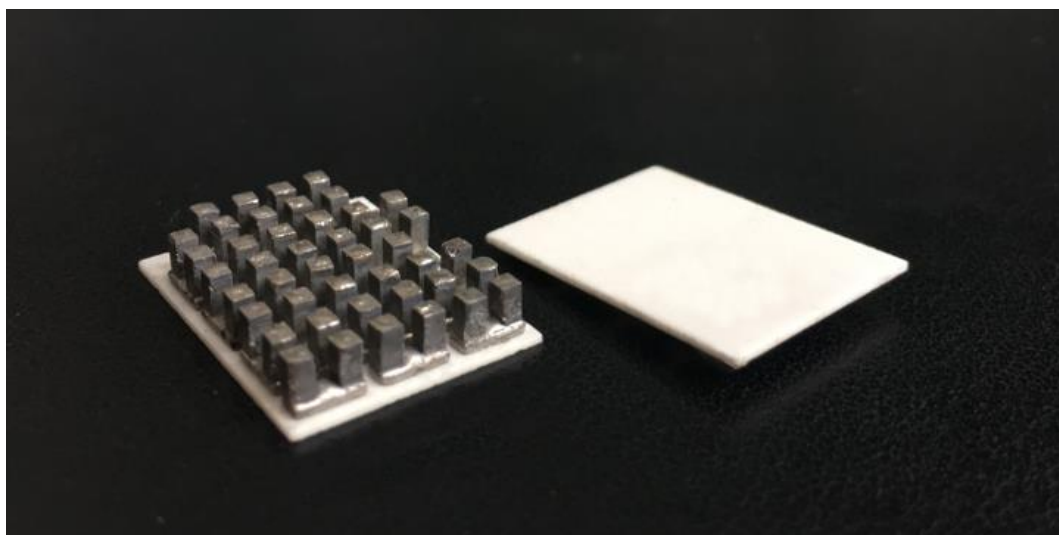
Olettaen, että yksi lämpöpari tarvitsee noin $0,00007 \text{ m}^2$ pinta-alan (keskiarvo),⁵¹ 223 lämpöparia tarvitsee $0,028 \text{ m}^2$ pinta-alan, jotta se saisi teoriassa 12 V jännitteen aikaan. Tässä työssä käytetyn kompostiastian kannen pinta-ala on $0,16619 \text{ m}^2$, mikä tarkoittaisi, että tällä lämpöparitiheydellä tämän astian kanteen saisi asennettua 2 374 lämpövastusparia. Tällä määrällä 12 V jännitykseen pääsisi $8,4246 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilaerolla seleeni-germanium yhdisteellä. Tämä tarkoittaa sitä, että olisi järkevää vähentää lämpöparien määrä 2 000 pariin, missä saavutettaisiin

⁵⁰ electronics-cooling.com, lämpösähkön suhteellisuusmuuttuja

⁵¹ thermoelectricsolutions.com, lämpösähkögeneraattoreita havainnollistettu

12 V jännitteeseen 10 °C lämpötilaerolla ja säästettäisiin hieman kustannuksissa, sillä seleeni sekä germanium ovat materiaaleina suhteellisesti paljon kalliimpia kuin kupari tai konstantiini.

Syy sille, miksi 10 °C lämpötilaero valittiin näihin esimerkkilaskuihin on se, että samalla kun lämpösähköilmiö synnyttää sähköä, lämpöenergia siirtyy kompostiastiasta sen sijaitsevaan tilaan pitäen kompostiastian lämmön nousua hitaampana sekä kompostiastian lähitilaa hieman lämpimämpänä kuin kaukaisempi tilan lämpötila. 10 °C on hyvä arvio lämpöparien lämpötilaerolle.



Kuva 2. Lämpöpareja kytkettynä sarjaan. Kuva: Thermoelectricsolutions.com

Koska lämpötilaero on suuri tekijä lämpösähköisessä tuotannossa, kompostiastiaa on hyvä pitää suhteellisesti viileässä huoneessa: mahdollisesti jokin versta tai kellar, mitä ei aktiivisesti lämmitetä normaaleille huoneenlämpötiloille. Täysin lämmittämättömillä tiloilla alin lämpötila menee Suomessa alle -20 °C, mikä on hyvä sähköntuotannon suhteen, kunhan kompostiastia on hyvin eristetty ja ilmavirta on hyvin optimoitu, ettei kylmä ilma hidasta ja mahdollisesti tapa reaktiota kokonaan. Kesäisin, kun lämpötila nousee yli 20 °C, potentiaalinen sähköntuotanto on paljon matalampi, mikä ei myöskään ole hyvä.

Ottaen huomioon pienet tuotetut jännitteet sekä virrat ja suhteellisesti huonot hyötysuhteet (5–15 %)⁵², kompostiastiasta syntyvät lämpösähköt eivät välttämättä ole siitä syntyvien tuotantokustannuksien arvoinen, sillä tarvittavat materiaalit ovat kalliita ja niitä tarvitaan paljon.

⁵² intechopen.com, lämpösähkön hyötysuhde

6 MAHDOLLISIA KÄYTTÖKOHTTEITA

Kuten kävi ilmi aikaisemmin, keskivertainen suomalainen asukas tuottaa keskimääräisesti 20–25 kg ruokajätettä vuodessa.⁵³ Käyttäen arvioituja jätteiden tiheyksiä ruokajätettä pystytään muuntamaan haluttuun muotoon. 25 kg ruokajätettä on teoriassa 107,1 MJ vuodessa parhaalla energiatiheydellä. Tämän jätemäärän voi myös muuntaa tilavuuteen $0,0625 \text{ m}^3 - 62,5 \text{ L}^{54}$, mikä ei edes täytä tässä työssä käytettyä esimerkkikompostiastiaa, minkä sopiva täyttömäärä on noin 118 litraa. Tällä vuosittaisella jätemäärällä tulisi käyttää hieman alle kahden henkilön jätteet yhdessä, jotta saataisiin täysinäinen astia kerran vuodessa, mikä ei ole niinkään tehokasta astian lämpötehon kannalta. Olisi hyvä olla tarpeeksi suuri jätevirta, joka riittäisi täyttämään kompostiastian edes kerran kolmessa viikossa, jotta sen teoreettinen 140W lämmitysteho pysyisi nimellisenä. Tämän tasoinen jätevirta tarvitsisi hieman alle 33 henkilön talouden.

Tällainen jatkuva kompostiastian täyttö termofiilisen vaiheen jatkamiseksi törmää nopeasti ongelmaan, mikä on astian täyttyminen. Mahdollinen ratkaisu tälle olisi jonkinlainen alaluukku, minkä kautta voisi lapiolla/kuokalla vetää melkein valmista multaa pois, ja laittaa se toiseen astiaan, missä mikrobit voisivat suorittaa kypsyemisvaiheen loppuun ja olla käyttövalmista multaa sen jälkeen.

⁵³ jukuri.luke.fi, Suomen ruokajäte

⁵⁴ nswai.org, ruokajätteiden tiheyksiä

6.1 Omakotitalo

Suomen tilastojen mukaan suomalaisen perheen koko on noin 3 henkilöä.⁵⁵ Tämä ei tietenkään riitä täysinäiseen kolmen viikon sykliin. Sitä paitsi perheisiin kuuluu lapsia, joiden ruokajättemäärä on suhteellisesti pienempi. Kun kolmen henkilön vuosittainen ruokajätevirta lasketaan yhteen, se olisi teoriassa n. 10 W lämpötehoa tuottava komposti vuoden ympäri, mikä ei ole mitenkään järkevä teho.

Olisi kai mahdollista, että omakotitalokortteli voisi jakaa kompostiastian, minne kaikki kasaisivat ruokajätteensä, mahdollisesti nostaan astian potentiaalista lämpövirtaa. Tämä tosin tarvitsisi 11 kolmen hengen perhettä, jotta tämän kompostiastian teoreettinen lämmitysteho nousisi noin 112 W, mikä on lähellä tässä työssä käytetyn esimerkkikompostiastian tuottamaa tehoa, mikä on 140 W. Tämänlainen toiminta voisi myös olla hyvä yhteisölliselle läheisyydelle. Tosin lämpötehon kannalta tämä ei ole järkevää, jätteet voisi kompostoida vain kompostoinnin takia.

6.2 Kerrostalo

Suomessa yleisimmät kerrostalot ovat 3–4 kerrosta korkeita, jokaisessa kerroksessa 8 asuntoa. Yksi kerros näistä on yleensä ilman asuntoja, joten yleisimmät asuntomäärät kerrostaloa kohden on siis 16–24 asuntoa.⁵⁶ Kolme henkilöä asuntoa kohden tuo kerrostalon asukasluvun 48–72 henkilöön. Tosin isännöintiyrityksen tilastojen mukaan kerrostalojen asuntojen keskiarvo on 12, laittaen asukasmäärän 36 henkilöön, mikä on paljon vähemmän kuin aikaisemmat arviot. Vaikka isännöintiyrityksen tilastot ovatkin rajoitetulta alueelta, nämä tilastot ovat uudempia, tehden niistä tarkempia tietoja kuin vuosia vanha kirja, joka on painettu

⁵⁵ stat.fi, suomalaisten perheiden koot

⁵⁶ Neuvonen, P. & Hieta-Wilkman, S. 2015

vuonna 2015. Mutta vaikka kirjan tilastot ovat aika vanhoja, nykyaikainen tilanne on tuskin paljon erilaisempi tähän verrattuna, joten voisi kuitenkin ajatella koko Suomen kerrostalojen asuntomäärän olevan lähempänä oikeaa lukua toisin kuin pienemmän alueen asuntomäärä. On myös otettava huomioon se, että kerrostaloissa on luultavasti pienempi keskiasukasmäärä, sillä kerrostaloasuntojen pinta-ala on pienempi omakotitaloihin verrattuna viitaten siihen, että niissä asuu enemmän vähemmän henkilöitä, esimerkiksi opiskelijoita tai kahden hengen pariskuntia, jotka luultavasti muuttaisivat isompaan asuntoon heidän perheensä kasvaessa. Kun otetaan huomioon kaikki nämä muuttajat 36 henkilön asukasmäärä vaikuttaa hyvältä keskiarviolta kuitenkin.

Asukasmäärä 36 henkilöä on kuitenkin tarpeeksi suuri ruokajätevirta tässä työssä käytettyyn esimerkkiastiaan, joka on 140 W. Mahdollisia käyttökohteita tämänkokoiselle lämmittimelle olisi esimerkiksi toimia pienen verstaan/varastotilan pien-teholämmittimenä. Tällaisia lämpötehoja ei ole järkevää ottaa talteen lämminvesivaraajaan, sillä tämä vesivaraaja olisi luultavasti koko rakennuksen käytössä. 140 watin lämmitin ei riittäisi tämän tasoiseen lämpimän veden käyttöön.

6.3 Ravintola

Ravintoloiden jätemäärää ei voi laskea suoraan ihmispopulaation kautta, koska ne ovat yrityksiä, joiden elinkeino on suoraan sidottu ruokaan. Tämä tarkoittaa myös sitä, että hyvin luultavasti ruokajätteen määrä on suurempi kuin normaalissa ta-

loudessa. Tutkimusten mukaan Suomessa olevien ravitsemusalalla olevien yritysten ruokajäte on noin 59,5 miljoonaa kiloa vuodessa.⁵⁷ Kun tämä luku jaetaan Suomessa olevien ravitsemusala-yritysten kanssa, saadaan keskiarvo jätemäärälle yritystä kohden, mikä on 5,9 tuhatta kiloa vuodessa eli 16 kg jätettä päivittäin.⁵⁸

Tämä on selvästi paljon enemmän kuin normaalissa yhden perheen taloudessa sekä kerrostalon kokoisessa yhteisössä. Teoriassa 5,9 tuhatta kiloa ruokajätettä toisi 25,28 GJ lämpöenergiaa vuodessa, mikä olisi noin 800 W lämmitin ympäri vuoden, mikä on todella suuri. Tällaisia lämpövirtoja pystyisi jopa käyttämään lämminvesivaraajan ylläpitämisessä. Lämminvesivaraajassa olevan veden tulee kuitenkin olla steriiliä, mihinkä 65 °C teoreettisesti suurin lämpötila ei riitä. On kuitenkin mahdollista käyttää toissijaista lämmitintä, mikä nostattaisi varaajan lämpötilan hetkellisesti 80 °C. Tämä tappaa vedessä mahdollisesti olevat bakteerit, mistä yleisin on Legionella.⁵⁹

⁵⁷ jukuri.luke.fi, Suomen ruokajäte

⁵⁸ mara.fi, suomalaisten ravitsemusyritysten määrä

⁵⁹ puutarha.net, Legionella-bakteeri

7 YHTEENVETO

Pitkä tarina lyhyeksi: kompostipohjainen lämmitys on työlästä, vaatii erityisesti suunnitellun tuotteen sekä tuottaa pienen määrän lämpöä verrattuna muihin lämmitystapoihin. Sen omavaraisuus on iso positiivinen asia ja jos löytyy jokin pienen tehon lämmitystarve, niin tämä soveltuisi sellaiseen työhön, jos on mahdollisuus ylläpitää sekä vahtia kompostiastian prosessia.

7.1 Mahdollisia tulevaisuuden jatkotutkimuskohteita

7.1.1 Mikrobikannan optimointi

Aerobinen kompostointi sekä anaerobinen mätäneminen tarvitsevat molemmat eloperäisen komponentin toimiakseen ja tämän komponentin optimoiminen ei ole niin yksinkertaista kuin muut vähemmän eloperäiset osiot. Yksi mahdollinen opinnäytetyön aihe voisi olla tutkimustyö keskittyen joko aerobisen tai anaerobisen työhön soveltuvien mikrobikantojen tunnistaminen sekä kategoriointi toimintalämpötiloilla sekä tehokkuuksilla yms. Näistä mikrobeista voisi olla mahdollista suunnitella optimaalinen mikrobiryhmä ja mahdollisesti erotella nämä mikrobit, viljellä niitä ja myydä tätä mikrobiryhmää kompostitehostajatuotteena.

7.1.2 Ilmateiden optimointi

Aerobisessa kompostoinnissa ilmankierto on tärkeä osuus tehokkaassa prosessissa. Tämä sama ilmankierto toimii myös haitallisena elementtinä, koska se alentaa kompostiastian kosteutta: varsinkin, jos tätä kompostiastiaa käytetään konvektiolämmittimen tapaisena laitteena. Yksi mahdollinen opinnäytetyön aihe voisi olla keskittynyt tähän ongelmaan ja tätä tutkiessa voisi suunnitella oman kompostiastian tämän työn pohjalta näyttäen, miten oikeanlainen ilmankierto potentiaalisesti ilmaa biojätettä tehokkaammin sekä vähentää kompostiastian kosteushäviöitä astiassa.

7.1.3 Lämpösähkötutkinto

Yksi mahdollinen suunnittelutyö olisi hyödyntää kompostiastian lämpösähköpotentiaalia ja suunnitella tämän ympärille mahdollinen tuote laskien tuottoarvot eri lämpötilaeroille. Ahkerat työsuorittajat voisivat myös rakentaa oman pienemmän skaalan lämpösähkögeneraattorit ja mitata tuotetut tasavirtasähköt. Koska tuotettu volttimäärä on suoraan verrannollinen lämpötilaeroon, mikä voi vaihdella suuresti, olisi myös mahdollista suunnitella porrastetun akunlatausmenetelmän, mikä osaisi itse vaihtaa oikeaan jännitteeseen sekä ilmoittaa nämä jännitteet reaaliajassa.

Koska tuotettu virta on pieni ja perinteiset happoakut purkautuvat itsestään, on myös mahdollista pohtia muita vähemmän käytännöllisiä ratkaisuja energian varastointiin, jotka eivät purkaannu itsestään niin nopeasti happoakkuun verrattuna.

7.1.4 Tutkimustyö

Yksi mahdollinen tutkimustyö tähän opinnäytetyöhön liittyen on tehdä lämpötilamittauksia erilaisilla jätelaaduilla. Koska CN-luku on suuri tekijä kompostointitehokkuudessa ja monen jätetyypin CN-luvut ovat jo tiedossa, olisi mahdollista selvittää jonkinlainen kerroin optimaalisen CN-luvun vääristymän tasolla ja mikrobien hajottamistehon alenemisella, josta voisi havainnollistaa, kuinka tärkeää oikean tasoinen CN-luku on kompostoisemisessa.

LÄHTEET

biltema.fi, putkieristeen lämönjohtavuus. Viitattu 18.3.2022. https://www.biltema.fi/rakentaminen/lvi/putkistot/putkieristeet/putkieriste-suora-2000023027?gclid=CjwKCAjw_tWRBhAwEiwALxFPoayUHVl0PQGE-LEYz29xdRVaUOFGiuZh5v6GfwOZTs7Pxsjne_CfsqBoCmzMQAvD_BwE

cdn.ttgmedia.com, lämpösähköilmiö eli Seebeckin ilmiö. Viitattu 21.3.2022. https://cdn.ttgmedia.com/rms/onlinelimages/networking_seebek_2015.jpg

Coosemans, J. Deprins, K. Mergaert, J. Ryckeboer, J. Swings, J. termofiiliset bakteerit. Viitattu 10.3.2022. <https://sfamjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1046/j.1365-2672.2003.01800.x>

ctherm.com, muovien lämmönjohtavuuksia. Viitattu 5.5.2022. <https://ctherm.com/resources/newsroom/blog/the-thermal-conductivity-of-unfilled-plastics/>

dlr.de, hypertermofiilibakteerit. Viitattu 6.3.2022. https://www.dlr.de/me/Portaldata/25/Resources/dokumente/publikationen/P2_11.pdf

ebay.com, lämpöpari. Viitattu 21.3.2022. <https://www.ebay.com/itm/292653243492>

electronics-cooling.com, lämpösähkön suhteellisuusmuuttujia. Viitattu 21.3.2022. <http://www.electronics-cooling.com/2006/11/the-seebeck-coefficient/>

energyeducation.ca, konvektion perusteet. Viitattu 18.3.2022. <https://energyeducation.ca/encyclopedia/Convection>

energyvanguard.com, virtaushäviöt. Viitattu 16.3.2022. <https://www.energyvanguard.com/blog/the-2-primary-causes-of-reduced-air-flow-in-ducts/>

engineeringtoolbox.com, kostean sekä kuivan ilman entalpia. Viitattu 16.3.2022.

https://www.engineeringtoolbox.com/heating-humid-air-d_693.html

engineeringtoolbox.com, suhteellinen ilmankosteus. Viitattu 26.3.2022.

https://www.engineeringtoolbox.com/humidity-ratio-air-d_686.html

Inkinen, P., Tuohi, J. & Tuohi, T. 2002. Momentti: Insinöörifysiikka. 1. Helsingissä: Otava.

instrumentationtools.com, lämpösähköilmiön perusteet. Viitattu 21.3.2022.

<https://instrumentationtools.com/seebeck-effect-theory/>

intechopen.com, lämpösähkön hyötysuhde. Viitattu 22.3.2022. <https://www.intechopen.com/chapters/65239>

Jiang, X. Kim, J. Yleiset mesofiiliset bakteerit. Viitattu 10.3.2022. <https://sfam-journals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1365-2672.2010.04841.x>

jukuri.luke.fi, suomen ruokajäte. Viitattu 24.3.2022. https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/547657/luke-luobio_49_2021.pdf?sequence=7&isAllowed=y

https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/547657/luke-luobio_49_2021.pdf?sequence=7&isAllowed=y

kupari.com, kupariputkien yleisiä kokoja. Viitattu 18.3.2022. <https://www.kupari.com/tekniikka-ja-tuotteet/tuotteet/>

link.springer.com, ruokajätteiden käsittelymenetelmiä. Viitattu 13.3.2022.

<https://link.springer.com/article/10.1186/2251-6832-4-1>

lme.com, metallien hintoja. Viitattu 18.3.2022. <https://www.lme.com>

mara.fi, suomalaisten ravitsemusyritysten määrä. Viitattu 24.3.2022.

<https://www.mara.fi/toimiala/tilastot/yritysten-ja-tyollisten-maara/ravintolayritysten-maara.html>

mdpi.com, orgaanisten jätteen energiatilavuuksia sekä -tiheyksiä 2. Viitattu 13.3.2022. <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/7/2284/htm>

muropaketti.com, materiaalien lämmönjohtavuuksia. Viitattu 18.3.2022. <https://muropaketti.com/tietotekniikka/ylikellotuksen-perusteet-teoria-lam-montuotto-jaahdytys-kayttojannite-ja-riskit/4/>

Mäkelä, M., Öistämö, J., Soininen, L. & Tuomola, S. 2008. Tekniikan kaavasto: Matematiikan, fysiikan, kemian ja lujuusopin peruskaavoja sekä SI-järjestelmä. 6. painos. Tampere: Tammertekniikka : AMK-kustannus.

ncbi.gov, bakteerien lämpötila-alueet. Viitattu 6.3.2022. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC217594/pdf/jbacter00247-0200.pdf>

Neuvonen, P. & Hieta-Wilkman, S. 2015. Kerrostalot 1975-2000. Helsinki: Rakennustieto.

nswai.org, ruokajätteen tiheyksiä. Viitattu 24.3.2022. https://www.nswai.org/docs/m.p_bhopal.pdf

omnicalculator.com, kostean ilman osapaineet. Viitattu 26.3.2022. <https://www.omnicalculator.com/physics/air-density>

puutarha.net, Legionella-bakteeri. Viitattu 24.3.2022. https://puutarha.net/artikkelit/16211/suojaudu_legionellabakteerilta_bosch.htm

researchgate.net, lämpösähköilmiön sisäinen resistanssi. Viitattu 21.3.2022. https://www.researchgate.net/publication/273121093_httpdxdoiorg1011552015531516

researchgate.net, orgaanisten jätteen energiatilavuuksia. Viitattu 13.3.2022. <https://www.researchgate.net/profile/Thomas-Sauer-2/publication>

tion/271431669_Determination_of_Thermal_Properties_of_Compost_Bulking_Materials_by_Using_Various_Methods/links/57840d8008aeca7daac3e94b/Determination-of-Thermal-Properties-of-Compost-Bulking-Materials-by-Using-Various-Methods.pdf

researchgate.net, ruokajätteiden käsittelymenetelmiä 1. Viitattu 13.3.2022.

https://www.researchgate.net/profile/Russell-Mahmood/publication/270397314_Food_waste-to-energy_conversion_technologies_Current_status_and_future_directions/links/59e958b70f7e9bc89ba1bcf9/Food-waste-to-energy-conversion-technologies-Current-status-and-future-directions.pdf

sciencedirect.com, Ilmankosteuden vähentäminen. Viitattu 20.3.2022.

<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/solid-desiccant>

sciencedirect.com, orgaanisten jätteiden energiatilavuuksia sekä -tiheyksiä. Viitattu 13.3.2022.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667010021001104>

scienceline.ucsb.edu, lämmin ilma nousee. Viitattu 5.5.2022. [https://scienceline.ucsb.edu/get-](https://scienceline.ucsb.edu/get-key.php?key=3901#:~:text=F%3Dm*g*(T,dense%20than%20the%20surrounding%20air)

[key.php?key=3901#:~:text=F%3Dm*g*\(T,dense%20than%20the%20surrounding%20air](https://scienceline.ucsb.edu/get-key.php?key=3901#:~:text=F%3Dm*g*(T,dense%20than%20the%20surrounding%20air)

[key.php?key=3901#:~:text=F%3Dm*g*\(T,dense%20than%20the%20surrounding%20air](https://scienceline.ucsb.edu/get-key.php?key=3901#:~:text=F%3Dm*g*(T,dense%20than%20the%20surrounding%20air)

Seppänen, R., Mannila, L., Kervinen, M., Konttinen, P., Karkela, L., Yli-Kokko, T., . . .

. Kairinen, K. 2013. MAOL-taulukot: Matematiikka, fysiikka, kemia. [Uud. laitos],

1. p. Helsingissä: Otava.

stat.fi, suomalaisten perheiden koot. Viitattu 24.3.2022.

https://www.stat.fi/til/perh/2019/perh_2019_2020-05-22_tie_001_fi.html

tandfonline.com, massavirtalaskujen esimerkkituloksia. Viitattu 14.3.2022.

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/1065657X.2016.1233082>

Thegreatcoursesdaily.com, ideaalikaasun tilayhtälön heikkous. Viitattu 19.3.2022. <https://www.thegreatcoursesdaily.com/why-ideal-gas-law-is-not-that-ideal/>

thermoelectricsolutions.com, lämpöpareja kytkettynä sarjaan. Viitattu 21.3.2022. <https://thermoelectricsolutions.com/wp-content/uploads/thermoelectric-generator-pellets-dice-thermoelements-semiconductors.png>

thermoelectricsolutions.com, lämpösähkögeneraattoreita havainnollistettu. Viitattu 21.3.2022. <https://thermoelectricsolutions.com/how-thermoelectric-generators-work/>

Thompson, K. & Salonen, S. 2008. Komposti. [Helsinki]: Gummerus

webpal.org, kompostoinnin vaiheet. Viitattu 6.3.2022. https://www.webpal.org/SAFE/aaarecovery/1_farm_recovery/humanure/new-chapter03_09.htm