

**REOVEESETTE JA ERINEVATE PLASTIJÄÄKIDE  
KÜTTEVÄÄRTUS**

**CALORIFIC VALUE OF SEWAGE SLUDGE AND OF  
VARIOUS PLASTIC WASTE**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Karl Sander Hunt

Üliõpilaskood: 183016NAEM

Juhendajad: Jane Raamets, lektor  
Laura Lokko, projektijuht

Tartu 2021

## **AUTORIDEKLARATSIOON**

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“24” mai 2021

Autor: Karl Sander Hunt

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“24” mai 2021

Juhendaja: Jane Raamets

/ allkirjastatud digitaalselt /

Juhendaja: Laura Lokko

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

“24” mai 2021 .

Kaitsmiskomisjoni esimees: Annely Kuu

/allkirjastatud digitaalselt /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina Karl Sander Hunt (sünnikuupäev: 16.09.1996)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

REOVEESETTE JA ERINEVATE PLASTIJÄÄKIDE KÜTTEVÄÄRTUS

,mille juhendajad on Jane Raamets ja Laura Lokko,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

---

<sup>1</sup>*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

Karl Sander Hunt /allkirjastatud digitaalselt/

24.05.2021

# TalTech Tartu kolledž

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Karl Sander Hunt, 183016NAEM  
Õppekava, peeriala: NAEM06/18, Tööstusökoloogia  
Juhendajad: Lektor, Jane Raamets, tel nr 55 61 33 44  
Projektijuht, Laura Lokko, tel nr 53 73 51 92

### Lõputöö teema:

Reoveesette kütteväärtuse tõstmine plastide lisamisega  
Calorific value of sewage sludge and of various plastic waste

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Leida, millise laialt levinud plastiga on võimalik saavutada kõige kõrgem kütteväärtus reoveesetega.
2. Leida, millise katses osalenud materjaliga oleks kõige efektiivsem kütteväärtust säilitada.

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Materjali läbitöötlemine, kirjanduse ülevaate koostamine	15.04.21
2.	Katsete läbiviimine	15.04.21
3.	Tulemuste kirjeldamine, arutelu koostamine	01.05.21
4.	Lõputöö esitamine	24.05.21

**Töö keel:** eesti keel

**Lõputöö esitamise tähtaeg:** "24" mai 2021

**Üliõpilane:** Karl Sander Hunt "24" mai 2021  
/ allkirjastatud digitaalselt /

**Juhendaja:** Jane Raamets "24" mai 2021a  
/ allkirjastatud digitaalselt /

**Juhendaja:** Laura Lokko "24" mai 2021a  
/ allkirjastatud digitaalselt /

**Programmijuht:** Annely Kuu "24" mai 2021a  
/ allkirjastatud digitaalselt /

# SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	7
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE.....	9
1.1 Reoveesete .....	9
1.2 Turvas.....	12
1.3 Biomass.....	13
1.3.1 Põhk .....	13
1.3.2 Saepuru .....	16
1.4 Plastikud .....	17
1.4.1 Polüpropüleen.....	18
1.4.2 Polüeteentereftalaat.....	19
1.4.3 Kõrge tihedusega polüetüleen ja madala tihedusega polüetüleen.....	19
1.4.4 Teised plastikud.....	20
1.4.5 Keskkonnasõbralik plastik.....	21
1.5 Meditsiinilised maskid.....	23
1.6 Nitriilkindad .....	24
1.7 Pelletid.....	25
1.8 Kütteväärtus .....	25
1.9 Tuhasus.....	26
2 MATERJAL JA METOODIKA.....	27
2.1 Töö materjal.....	27
2.2 Töö metoodika.....	28
2.3 Tööprotsess .....	29
3 TULEMUSED.....	34
3.1 Materjalide kütteväärtused.....	34
3.2 Materjalide tuhasus .....	42
3.3. Materjalide niiskusesisaldus .....	44
4 ARUTELU.....	46
KOKKUVÕTE.....	50
SUMMARY.....	52
KASUTATUD KIRJANDUS .....	54

## EESSÕNA

Lõputöö teema ja sõnastuse pakkus autorile välja juhendaja Jane Raamets ja töö koostas üliõpilane Karl Sander Hunt. Töö koostati Tallinna Tehnikaülikooli Tartu kolledžis, kus viidi läbi katsed ning koguti andmeid lõputöö jaoks. Tööd juhendasid lektor Jane Raamets (PhD) ja projektijuht Laura Lokko (MSc).

Töö autor soovib tänada juhendajaid abi eest. Samuti tänab autor TalTech Tartu Kolledži töötajaid, oma peret ning sõpru, kes olid töö kirjutamise protsessil autorile toeks.

Antud töös põletati reoveeset, biomassi, plastijäätmeid ja meditsiinilisi maski ning nitriilkindaid. Leiti nende kütteväärtused, tuhasus ning niiskusesisaldus ja saadud tulemuste põhjal tehti järeldus, kas ning kuidas oleks võimalik tõsta reoveesette kütteväärtust ning millega seda on kõige efektiivsem kokku segada. Kõige efektiivsemaks osutus antud töös reoveesette segamine biomassiga (turvas, põhk, saepuru), sest sellise segu loomisel oli kõige väiksem individuaalne kütteväärtuse kadu. Kõige kõrgem kütteväärtus saavutati reoveesette segamisel LDPE-ga.

Märksõnad: reoveesete, kütteväärtus, pakendijäätmed, plastijäätmed, magistritöö

## SISSEJUHATUS

2019. aastal tekkis Eestis 20,21 miljonit tonni jäätmeid (Statistikaamet, 2021a). Suuremat tähelepanu pööratakse plastikute taaskasutusele, ümbertöötlemisele ning otsitakse uusi viise, kuidas käidelda tekkivaid jäätmeid (Schwarz et al., 2021). Tehtud on ka edusamme ning on leitud viise, kuidas ümber töödelda teatud sorti plastikuid, kuid on jäätmeid, mille taaskasutus on raskendatud või liialt kulukas (Klemeš et al., 2020).

2019. aasta lõpul alanud pandeemia suurendas peamiselt meditsiinivaldkonda kuuluvate jäätmete teket (Parashar & Hait, 2021). Kirurgiliste maskide suurenenud tarbimise tõttu prognoositakse, et ülemaailmselt on maskidest tekkiv plastikujäätmete hulk tõusnud 1,6 miljoni tonnini päevas, mis tähendab 3,4 miljardi ühekordse näomaski kasutamist ühes päevas ülemaailmselt (Benson et al., 2021).

Maailma rahvaarvu kasvuga on suurenenud reoveesette hulk, kuid selle kasutamine on problemaatiline (Stehouwer, 2010). Reoveesetet on kasutatud pärast selle töötlemist põllumajanduses väetisena, kuid nähes, et maailmas on ka probleemiks aina suurenev energiavajadus ning reoveesetest valmistatud väetise kasutamine on toidukasvatamise jaoks piiratud, siis on võimalus reoveesetet rikastada jäätmete või loodusvaradega ja kasutada seda energia tootmiseks (Hao et al., 2018; Keskkonnaministeerium, 2019).

Nii oleks võimalik kasutada ära reoveesette teatud omadusi, millest saaks toota nii soojus- kui ka elektrienergiat (Singh et al., 2020).

Magistritöö eesmärgiks on uurida reoveesette rikastamist erinevate plastmaterjalidega ja leida, kas ning millisel määral on võimalik tõsta reoveesette kütteväärtust. Antud eesmärgi täitmiseks on töö autor püstitanud hüpoteesi ja uurimisküsimuse:

- 1) Mida suurem on plasti sisaldus küttesegus, seda kõrgem on segu kütteväärtus.
- 2) Milline uuritavatest segudest on kütmiseks kõige efektiivsem oma kütteväärtuse poolest?

Magistritöö teema hõlmab tänapäeva maailmas olulisi probleeme, sest üha enam on vaja vältida jäätmete teket ning samuti on vaja leida kasutus juba olemas olevatele jäätmetele. Reoveesette teke suureneb rahvaarvu kasvuga nii samuti nagu kasvab ka plasti tootmine inimkonna tarbimise suurenemisega. Seetõttu on vaja leida nendele jäätmetele uus eesmärk või siht, kuidas saab neid ära kasutada inimkonnale kasulikul

viisil. Ülemaailmsed probleemid on pidev toidukasvatamise vajaduse suurenemine ning aasta - aastalt suurenev energiavajadus. Seetõttu soovin uurida ja hinnangu anda sellele, kas on võimalik väärtust anda antud töös uuritavatele jäätmetele.

Uurimistöö esimeses pooles antakse kirjandusallikate põhjal ülevaade reoveesetest, biomassist (turbast, põhust, saepurust), erinevatest plastikutest, mida segati reoveesetega, et luua tablette kütteväärtuse mõõtmiseks. Seejärel antakse lühike ülevaade pelletitest, kütteväärtusest ja tuhasusest. Teises peatükis käsitletakse meetodikat ja materjalide töötlemise viise. Töö kolmas ja neljas osa näitavad uurimistöö tulemusi ja arutelu, mida saab kogutud andmete põhjal välja tuua. Sellele järgneb kokkuvõte.



# 1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

## 1.1 Reoveesete

Reoveesete on reovee puhastamisel tekkiv toitainerikas ja muid ühendeid sisaldav kõrvalprodukt (Keskkonnaministeerium, 2019). Seda peetakse efektiivseks orgaaniliseks väetiseks, kuid selle kasutamist laialdaselt põllumajanduses takistab saasteainete sisaldus (*Ibid*). Reoveesetest võib leida raskmetalle, ravimijääke ja patogeenseid mikroorganisme, mis on põllumajanduses mitte aktsepteeritavad lisandid (*Ibid*). Need saasteained on kahjulikud nii inimestele kui ka looduskeskkonnale, kuid efektiivne oleks saasteainetest eraldada kasulikud toitained ning need ringlusesse suunata või leida reoveesetele teistsugune kasutus (*Ibid*).

Ajavahemikul 2014-2015 tekkis 150 000 m<sup>3</sup>/a (märgkaal) reoveesetet ning sellel perioodil Keskkonnaministeeriumi poolt läbiviidud küsitluse põhjal vee-ettevõtete seas selgus, et 11% reoveesetest ei leia kasutust ning kuhjub reoveepuhasti juurde (Keskkonnaministeerium, 2017). Jäätmeseadusest ning jäätmehierarhiast (joonis 1.1 (Keskkonnaministeerium, 2017)) tulenevalt on kõige olulisem jäätmetekke vältimine (*Ibid*). Seega on vee-ettevõtetel kui jäätmetekitajatel ja jäätmevaldajatel kõrgendatud huvi sellest ehk reoveesetest luua toode või võimalus need jäätmed ise ära kasutada erinevatel viisidel, sest nende jäätmete käitlemine või üle andmine teistele jäätmekäitlejatele oleks kulukam ja ebaefektiivsem (*Ibid*).



Joonis 1.1 Jäätmehierahia (Keskkonnaministeerium, 2017).

Senini on kasutatud töödeldud reoveesetet kompostiks haljastuses või tööstusmaastike rekultiveerimisel, kuid metaankäärituse või termilise töötlemise läbides võib setet kasutada ka mujal (Keskkonnaministeerium, 2019). Sellest olenemata on reoveesette taaskasutus problemaatiline selles sisalduvate saasteainete tõttu, milleks võivad olla nii raskmetallid kui ka ravimijäätmed (*Ibid*). Seega selle kasutamine väetisena omab piiranguid, mis keelab aasta pärast reoveesette kasutamist ravimtaimi, maitsetaimi, köögivilja- või marjakultuure kasvatada (*Ibid*). Lisaks ei või sellel maal, kus reoveesetet kasutatud on, 2 kuu jooksul karjatada loomi (*Ibid*). Oluline on nii töötlemata kui ka töödeldud setet ja komposti kontrollida, et tegemist ei oleks nii inimesele kui ka keskkonnale ohtlikke ühendeid sisaldava tootega (Nei & Lillenberg, 2009).

Reoveesette kasutamine kompostina omab negatiivse küljena selle kasutamise tasuvust, kuna antud toote transport on kulukas võrreldes mineraalväetiste kasutamisega ning lisaks tulevad juurde täiendavad seireõuded, kui reoveesetet soovitatakse kasutada väetisena (Keskkonnaministeerium, 2017).

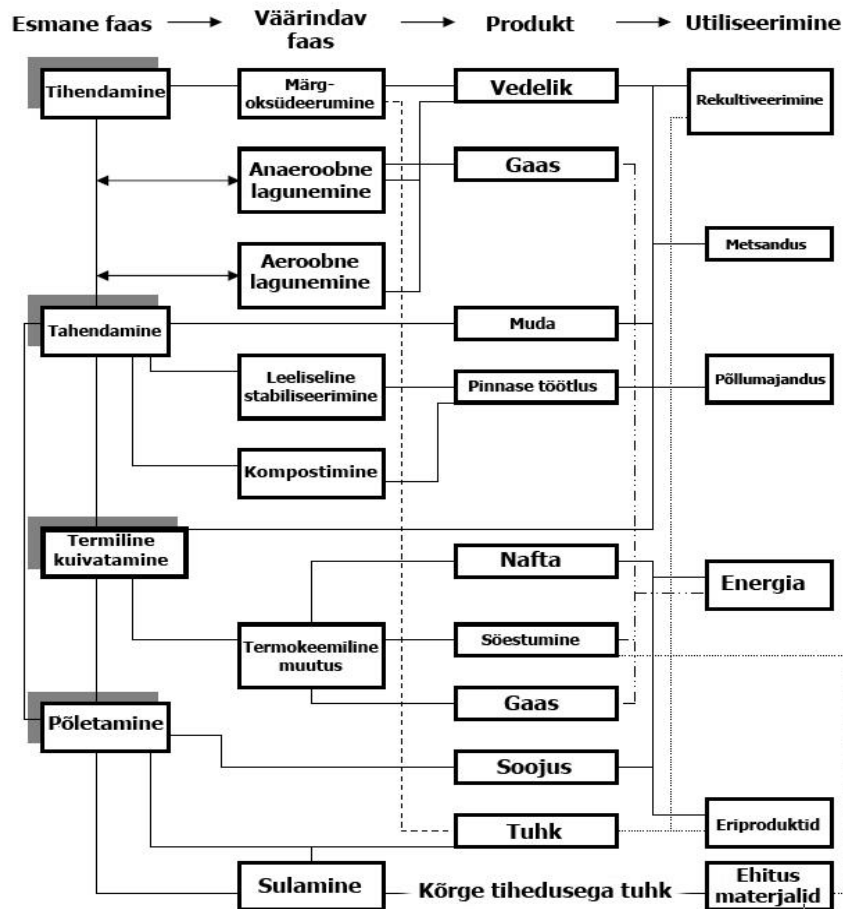
Veel üks efektiivne viis reoveesetet kasutada oleks suunata see põletamisele. Põletamiseks on vaja reoveesete kuivatada optimaalse niiskusesisalduseni, mis on alla 60% (B. Li et al., 2014). See tähendab võimalikku madalaimat veesisalduse saamist, mille järel saab reoveesetest pressida pelletid või briketid, mis kasutaks ära tekkiva reoveesette täies mahus (*Ibid*). Lisaks kuivatamisele sete tihendatakse ning see aitab viia transpordikulud minimaalseks (Keskkonnaministeerium et al., 2015).

Reoveesettele on võimalik lisada teisi kasutust mitte leidvaid jäätmeid või maavarasid, mis vähendaks üleüldist jäätmete hulka maailmas, kuid siiski peaks kütteväärtus jääma teatud parameetrite sisse (European Commission, 2006). Need parameetrid peavad ületama või olema võrdsustatud teiste laialdaselt levinud kütustega, et sellisel ettevõtmisel oleks kasu (*Ibid*).

Reoveesette kasutamine kütusena eeldab tavaliselt selle segamist mõne teise toorainega (Liang et al., 2021). Kasutusel on reoveesette segamine tahkete olmejäätmetega, tsemendi toorainega või kivisöega (*Ibid*). Antud segusid põletatakse tööstuslikult erinevates põletusahjudes, mis on seotud spetsiifilise toormega, nagu tsemendi valmistamine käib tsemendiahjus (*Ibid*). Märja reoveesette kohene segamine toormega tekitab probleeme põletusahjus, sest kuivatamata reoveesete omab suurt niiskusesisaldust (kuni 99%) ja suurt lendainete hulka (*Ibid*). See tekitab põletusahjus probleeme, milleks on temperatuuri langus, ahju temperatuuri kõikumine ning süütamise probleemid (*Ibid*). Probleemivabamaks põletamiseks kõigepealt reoveesete

kuivatatakse mehaaniliselt, millega saavutatakse niiskusesisaldus 80% - 85% lähedale (Cai et al., 2016). Sellele järgneb termiline kuivatamine, mis on väga energiakulukas, või bioloogiline kuivatamine, mis on vähem kulukas (Hao et al., 2018). Samuti on võimalik ka mehaaniline kuivatamine, kuid see pole iseseisvalt piisavalt efektiivne (*Ibid*). Bioloogiline kuivatamine on energiat säästev, sest mikroorganismid eemaldavad vee aeroobsel mikroobide lagundamisel tekkiva soojusega (*Ibid*). Bioloogiline kuivatamine tõstab reoveesette esialgset madalamat kütteväärtust 37,9% võrra esialgse 3,885 ± 0,061 MJ/kg pealt 5,356 ± 0,02 MJ/kg peale (*Ibid*). Kuivaks reoveesetteks loetakse alla 20% niiskusesisaldusega materjali ning pool kuivaks 45 - 70% reoveesetet (Syed-Hassan et al., 2017).

Joonisel 1.2 (Furness et al., 2000) on näha, kuidas reoveesette puhul tavapärasel töötlemisel tekivad seosed ning kuidas töötlemise järjekord välja näeb (Furness et al., 2000). Joonisel 1.2 on näidatud, et esimeses faasis toimuvad manuaalsed toimingud nagu tihendamine ja muul viisil vee välja pressimine. Pärast seda jõutakse edasi väärindamise faasi, kus edasi tekivad produktid, millele järgneb utiliseerimine (*Ibid*).



Joonis 1.2 Reoveesette töötlemine ja utiliseerimine (Furness et al., 2000).

## 1.2 Turvas

Turvas, mis on üks levinuimaid biomassi liike, on orgaanikast koosnev maavara, mis sisaldab endas nii huumust kui ka mitte täielikult lagunenuid taimejäänuseid (Orru & Orru, 2003). Turbaalad hõivavad rohkem kui 4 miljonit km<sup>2</sup> ja neis on kolmandik kogu maailma pinnase süsinikuvarudest (Kosyakov et al., 2020). Enamik neist (3,4 miljonit km<sup>2</sup>) varudest asuvad boreaalsetes ja subarktilistes vööndites (Joosten & Clark, 2002). Turba mineraalainete mass võib ulatuda kuni 35 % kuivainete massist. (Orru & Orru, 2003) Turvas tekib veerohkes ja hapnikuvaeses soomuldade pinnapealses kihis (Kosyakov et al., 2020). Looduslikus olukorras on turvas endasse imanud suures koguses vett, mis võib keskmiselt ulatuda 90 %, kuid õhkuivas olukorras ulatub veemaht 30 - 40% vahele (Eesti Turbaliit, 2018).

Aastane turba juurdekasv jääb 0,5 - 1 mm juurde, mis teeb sellest taastumatu loodusressursi (Joosten & Clark, 2002). Turvast leidub kohtades, kus taimekasv on kiirem kui lagunemine, kuid olulisem turba tekke juures on vee olemasolu (Joosten & Couwenberg, 2008). Turvas võib moodustuda sammaldest, kõrrelistest, puudest ja teistest taimedest (Orru & Orru, 2003). Samuti sõltub turba moodustumine globaalsest asukohast - maailma põhja piirkondades on peamiseks turba moodustajaks sammal ning troopikas on selleks puud (Kosyakov et al., 2020). Suur osa tänapäeval olemasolevad turbaalad on moodustunud viimase 10 000 aasta jooksul alates viimasest jääajast (Joosten & Clark, 2002). Turbaalad on ühed kõige ruumiliselt tõhusamad ja efektiivsemad süsinikuvarude talletajaid, näiteks troopilises tsoonis asuv turbaala hoiab endas 10 korda rohkem süsinikku hektari kohta kui teised ökosüsteemid (Joosten & Couwenberg, 2008).

Turvas jaguneb kõrgsooturbaks ja madalsooturbaks (Vares et al., 2005). Kõrgsooturvas on vähelagunenud, sademeveest toitunud ja moodustab 15 % turbavarudest (Eesti Turbaliit, 2018). Madalsooturvas on hästilagunenud ning toitub põhjaveest (Eesti Märgalade Ühing, 2021). Madalsooturvas moodustab tiheda ja raske massi ning seda kasutatakse peamiselt kütteks ja kõrgsooturvast peamiselt aianduses (Eesti Turbaliit, 2018).

Kütteturvas pakub energiaallikana kütteväärtus 3,2 MWh 1 tonni turba kohta (Vares et al., 2005). 1 m<sup>3</sup> turba põletamisel võrdsustakse see 1,3 m<sup>3</sup> küttepudega ning 1 tonn kütteturvast moodustab üldiselt mahu 3,5 - 4 m<sup>3</sup> (AS Tootsi Turvas, 2020). Kütteturba tavaline tuhasisaldus jääb 4 - 6 % vahele (Vares et al., 2005).

## 1.3 Biomass

Eestis on energiakultuurid suhteliselt uus nähtus (Tartu Regiooni Energiaagentuur, 2013). Energiakultuuridena defineeritakse vedelate biokütuste ja biogaasi tootmise lähteaineid, samuti otseseks põletamiseks sobivat massi, mida saab kasutada soojuse ja elektri koostootmiseks (*Ibid*). Rohtse biomassi varude kasutamine on olnud siiani pigem piiratud, kuid paraku ei tähenda seda, et põllumajanduslikke jääke ei põletata (*Ibid*). Leidub andmeid, et seda tehakse pärast saagikoristust põllul, mistõttu tekkitab kontrollimatu heitmete allikas, mille energeetilist potentsiaali ei kasutata ära (*Ibid*).

Enamus energiatootmiseks kasutatavat biomassi on kõrge niiskusesisaldusega, mis on vahemikus 50–63 massiprotsenti, sõltuvalt aastaajast, ilmast ja biomassi päritolust (energiakultuurid või kõrvalsaadused, näiteks metsandusjäätgid, saepuru, munitsipaal-, põllumajandus-, tööstusjäätmed) (Alamia et al., 2015). Sellise niiskusesisaldusega massi põlemisprotsess ei ole efektiivne ning seetõttu on tarvis viia biomassi kasutamisel selle niiskusesisaldus umbes 10 massiprotsendini (Fagernäs et al., 2010). Kirjanduses on näidatud, et biomassi kuivatamisprotsess pakub põlemisel ulatuslikke eeliseid, näiteks väiksemad suitsugaaside emissioonid ja suurenenud katla kasutegur (H. Li et al., 2012).

### 1.3.1 Põhk

Põhk on teraviljakasvatuses tekkiv kõrvalsaadus, mis sisaldab endas taimevarsi, lehti ja teradest vabanenud viljapäid (Tölp, 2010). Materjal on segu tselluloosist, hemitselluloosist, ligniinist ja ränioksiidist ning taimede varred on kaetud vahataolise ja vetthülgava kihiga (Liuzzi et al., 2020). Põhk on põllumajanduslik jääde, mis tähendab seda, et tegemist ei ole saagiga ning tavapärase põllutöö käigus seda ei koguta (Cornaro et al., 2020). Loomasöödana põhk väärtust ei oma, kuid seda on võimalik kasutada kas allapanu materjalina või mulla viljakuse parandamiseks (Cascone et al., 2019). Kuna tegemist on tekkiva kõrvalsaadusega, siis ei ole alati dokumenteeritud palju ning kus oleks võimalik saada kõige kvaliteetsemat põhku bioenergia jaoks (Kukk, 2016).

Erinevate teraviljade kasvatusel tekib erinevate omadustega põhk (Cornaro et al., 2020). Põhu ressurss sõltub kasvatamise ajast ja asukohast, samuti teravilja liigist ja sordist (Liuzzi et al., 2020). Samuti mõjutab põhu ressursi väetamine, ilmastik, mis valitses kasvatamise ajal, ning ka mullastik (Vares et al., 2005). Vähem sõltub ilmastikust taliviljade tera- ja põhusaak, suviviljad on aga enam mõjutatavad põuast, millel on mõju terade ja põhu vahel biomassi jaotumisele (Eesti Konjunkturiinstituut, 2008).

Põhku saab kasutada energia saamiseks mitmeti (He et al., 2018). Sellest on võimalik valmistada biosütt (Hansen et al., 2017), tselluloosist etanooli (Shadbahr et al., 2018) ning biogaasi (He et al., 2018). Põhust energia tootmine aitab vähendada atmosfäärireostust, kaitsta keskkonda ning leevendada ka energiakriisi (Srinuanpan et al., 2018). Rahvusvahelise Energiaagentuuri stsenaariumid tuginevad fossiilkütuste kasutamise vähendamiseks just elektri ja soojuse tootmiseks tahkest biomassist, märgsõnnikust ja maisist valmistatud biogaasist (van Kooten, 2017).

Põhku kasutatakse energiatootmiseks tahke kütusena kateldes (Justsen Energitechnik, 2020). Põhku energiaks kasutades on vajalik, et põhu niiskusesisaldus oleks umbes 15%, sest kõrgema niiskusesisalduse juures on põhul korrosiooni soodustavad omadused (Caslin & Finnan, 2010). Korrosioon tekib, sest suitsugaasides sisalduvad kloor ja aluselised ühendid põhjustavad, kas kaaliumkloriidi (KCl) või naatriumkloriidi (NaCl) tekke, mis mõlemad on korrosiivsete omadustega ühendid (Kaljuste, 2011). Küll on põhu puhul tegemist süsinikneutraalse kütusega ning selle põletamisel ei tõuse atmosfääris kasvuhoonegaaside hulk (da Silva et al., 2021).

Põhku põletatakse biomassi kateldes, kuid on ka eraldi põhupallidele väljatööteldud katlad (Justsen Energitechnik, 2020). Biomassi kateldes põletamisel tuuakse esmalt kindlas mõõdustikus põhupallid, mis on vastavad efektiivse transpordi ning käitlemise jaoks (*Ibid*). Seejärel haaratsid tõstavad põhupallid kandurile, mille järel viiakse see purustisse, mis purustab põhu peeneks hakkeks (*Ibid*). Seejärel peenendatud põhk läheb katlasse, mille analoog on kujutatud järgmisel lehel joonisel 1.3 (Justsen Energitechnik, 2021), kus see põletatakse kütteväärtuse saamiseks (*Ibid*). Biomassi katlas põletatakse granuleeritud puitu ja puidupelleteid, puiduhaket ja põhku 15 % niiskusesisalduse juures (*Ibid*).

15 % niiskuse juures on erinevate põhutüüpide kütteväärtused ja energiaväärtused võrdväärsed, nagu järgmisel lehel olevas tabelis 1.1 (Caslin & Finnan, 2010) on märgitud, kuid tuhasuse hulk on odrapõhul madalam kui nisu- ja rapsipõhul. Tuhasisaldus jääb põhul 4,5-6,5 % piiridesse, mis on kõrgem kui puidupõhistel kütustel, kuid see-eest on nende sulamistemperatuur suurel määral madalam (Vares et al., 2005).



Joonis 1.3 Põhu põletamiseks mõeldud 7 MW Justseni biomassi katel (Justsen Energitechnik, 2021).

Euroopas on kõige enamlevinud nisu- ja odrapõhk, kuid maailmatasandil tekib kõige enam riisipõhku ja -kestasid (Yilmaz et al., 2018). Eestis kasvatati 2016. aasta seisuga kõige enam nisu ja speltanisu kokku 426 549 tonni, millele järgnes oder 333 330 tonniga (Statistikaamet, 2021b).

Tabel 1.1 Põhu energiväärtus tonni kohta 15% niiskusesisaldus (Caslin & Finnan, 2010).

<b>Põhu tüüp</b>	<b>Kütteväärtus(MJ/kg)</b>	<b>Energiväärtus(kWh/t)</b>	<b>Tuhasuse hulk (kg/t)</b>
Nisu	14,4	4,032	57
Oder	14,7	4,116	48
Raps	14,3	4,004	62

Euroopa riikidest kasutab enim põhku energiatootmise eesmärgil Taani, kus on soojuse – ja elektri koostootmisjaamad (Voytenko & Peck, 2012). Taanis on tehtud enam kui 35 aasta jooksul uuringuid, et arendada välja tehnoloogilised lahendused, mis võimaldavad põhku kasutada seadmetes, mis on algselt mõeldud kasutamiseks kivisöega (Nikolaisen et al., 1998). Igal aastal kasutatakse seal ligi 1,5 miljonit tonni põhku, et toota sellest

energiat (Voytenko & Peck, 2012). Kasutusel on nii väikesemahulised (peamiselt põllumajandusettevõtete juures) kui ka keskmise suurusega põhukatlad (kasutatakse kaugkütteks) (Nikolaisen et al., 1998). Lisaks Taanile leiab põhk kütusena kasutamist ka Rootsis ning peamiselt Skåne piirkonnas (Voytenko & Peck, 2012).

Ka Eestis on kasutatud soojuse tootmiseks põhku. Esmalt tehti seda 2006. aastal, mil Tamsalu Kalor AS alustas tööd kaugküttesoojuse tootmiseks mõeldud katel (Eesti Konjunktuuriinstituut, 2011). Aastas kulus 300 - 400 tonni peamiselt nisupõhku ning vajalik toore saadi lähedal paiknevast farmist (*Ibid*). Põhukatel on kasutusel lisaküttekatlana ning see leiab kasutust talvisel kütteperioodil või suvel, mil on vaja soojendada tarbevett (*Ibid*).

Lisaks Tamsalule on kasutatud põhku kütmiseks ka Lihulas, kus peamiselt põletatakse Taani päritolu katlas Matsalu luhahainamaadelt pärit heina (Kuus, 2019). Põhku Lihulas napib, sest põllumehed kasutavad seda valdavalt ise põldude väetamiseks (*Ibid*).

### **1.3.2 Saepuru**

Saepuru on puidutööstuse jääk, mida kasutatakse kütusena termilistes protsessides. Samuti on see kasutusel isoleeriva materjalina. (Phonphuak & Chindaprasirt, 2015) Saepuru tekib, kui saehambad lõikavad puitu soovitud suurusega osadeks puidutööstuses (Bajpai, 2018). Tänapäevaks on saeühed loodud peenikesteks ja on suurenenud saehammaste hulk (*Ibid*). See on muutnud saepuru liiga peeneks, et seda kasutada paberi või pabertaskurätikutööstuses täitematerjalina (*Ibid*). Tihtipeale ei saa kasutada liiga peeneks jahvatatud saepuru tselluloositehastes kiudaine allikana (*Ibid*).

Saepuru briketid vajavad kaitset ilmastikutingimuste eest nii transpordil kui ka hoiustamisel, mis on lisakulu (Antwi-Boasiako & Acheampong, 2016). Arengumaades tekib palju saepuru, millest saaks luua saepurubrikette, et toota efektiivsemalt energiat (*Ibid*). See on võrreldes fossiilkütustega keskkonnasõbralikum energia ning vähendab kasvuhoonegaaside teket (*Ibid*). Saepuru brikettideks tegemine on oluline jäätme energiaks muutmise süsteeme, mis annab väärtuse muidu kasutust mitte leidnud kõrvalsaadusele (*Ibid*).

Saepuru kütteväärtus 28 % niiskusesisalduse juures on 18,8 MJ/kg (Shyamalee et al., 2015). Kui saepuru kasutatakse briketi tootmiseks, siis ei tohi saepuru niiskusesisaldus ületada 12 - 14 % (Vares et al., 2005).



## 1.4 Plastikud

Aastast 1964 kuni 2014 on ülemaailmne plastikute tootmine tõusnud 15 miljonist tonnist aastas 311 miljoni tonnini aastas, mis tähendab 20 kordset tõusu 50 aastaga (Plastics Europe, 2015). Need arvud ei sisalda polüeteentereftalaatkiude, polüamiidkiude ja polüakrüül kiude, aga sisaldab termoplaste, polüuretaane, elastomeere, termoreaktiivseid polümeere, liime, katteid, hermeetikuid ja polüpropeenkiude (*Ibid*). Suurimaks plastiku tootjaks on Hiina, kes toodab ligi veerandi maailma plastikust (PlasticsEurope, 2013). Globaalne plastikutootmine on jätkuvalt tõusuteel ning 2018. aastal saavutati 359 miljoni tonni piiri, kuid see-eest Euroopa-sisene plastikutootmine on langenud vastavalt 2017. ja 2018. aasta andmetele ühe aasta jooksul 64,4 miljoni tonnilt 61,8 miljoni tonnini (Plastic Europe, 2019). Plastikuid kasutatakse kõige rohkem pakendamistööstuses, seejärel ehituses ning autoduses (*Ibid*). Plastikud on oma kütteväärtuselt võimelised konkureerima teiste laialt kasutatud kütustega, mis on väljatoodud tabelis 1.2 (Panda et al., 2010).

Tabel 1.2 Plastikute kütteväärtus võrreldes tavapäraste kütustega (Panda et al., 2010).

<b>Kütus</b>	<b>Kütteväärtus (MJ/kg)</b>
Metaan	53
Bensiin	46
Kütteõli	43
Kivisüsi	30
Polüetüleen	43
Plastikute segu	30-40
Tahked olmejäätmed	10

Plastikud saab jagada kaheks, milleks on termoplastid ja termoreaktiivsed plastikud (Modor Plastics, 2017). Termoplastikud ehk termopehmedavad plastikud on plastikuliik, mida saab sulatada ning vormida seda soojendades kõrgetel temperatuuridel ja jahutades see taheneb, kaotades elastsuse (Sastri, 2010). See tähendab, et need omadused on pöörduvad ja neid plaste saab vastavalt tingimustele töödelda ühest vormist teise, mis tähendab võimalust neid korduvalt külmutada, soojendada ning vormi ümber kujundada (*Ibid*).

Levinumad plastikuliigid, mis kuuluvad termoplastide alla on polüetüleen (PE), polüpropüleen (PP), polüvinüülkloriid (PVC), polüeteentereftalaat (PET), polüstüreen (PS), vahtpolüstüreen (EPS), akrüülnitriilbutadienstüreen (ABS), polüamiid (PA) ja polükarbonaad (PC) (Plastic Europe, 2019).

Termoreaktiivsed plastikud läbivad temperatuuri kõrge tõstmise tagajärjel keemilised muutused, mille järel nende füüsiline vorm muutub jäävaks ning neid ei saa uuesti temperatuuri kõrgeks viies töödelda ja ümber sulatada (*Ibid*). Levinumad plastikuliigid, mis kuuluvad termoreaktiivsete plastikute hulka on polüuretaan (PUR), silikoon, vinüülestrid, küllastumata polüestrid ja epoksiidvaigud (*Ibid*).

### **1.4.1 Polüpropüleen**

Polüpropüleen ehk PP on väga laialdaselt levinud ning moodustas suurima mahu kasutusel olevast termoplastist (Plastic Europe, 2019). PP moodustas 2018. aasta seisuga 19,3 % nõutavast plastikust (*Ibid*). Kasutushulga põhjuseks on PP kasutamine nii toiduainete pakendamiseks, autotööstuses vajalike auto osade tootmiseks kui ka raha tootmiseks (*Ibid*).

PP on tugev, jäik ja kristalne termoplast, mis on laialdaselt kasutusel, sest see on oma tootmise poolest üks odavamaid plastikke, mis on tänapäeval saadaval (SpecialChem, 2017). Sel on madalaim tihedus toorplastide seas (*Ibid*). Polüpropeen jaguneb kahte tüüpi polümeerideks - homopolümeeriks ja kopolümeeriks (*Ibid*). Nende sulamispunktid on vastavalt homopolümeeril 160 – 165 °C ja kopolümeeril 135 – 159 °C (*Ibid*). Homopolümeeril on hea tugevuse ja kaalu suhe ning see on jäigem ja tugevam kui kopolümeer (*Ibid*). Homopolümeeril on hea keemiline vastupidavus, töödeldavus, löögikindlus, jäikus ja seda saab kasutada toiduainete pakendamisel (*Ibid*). Kopolümeeri ei ole soovitatav kasutada toiduga kokkupuutuvate pakendite jaoks (*Ibid*). Kopolümeeril on parem vastupidavus pingelõhedele, parem löögitugevus ja see on vastupidavam madalamal temperatuuril kui homopolümeer (*Ibid*).

PP vormi vormimisel on selle sulamistemperatuuriks 200 - 300 °C (SpecialChem, 2017). PP on toorplastide seas üks kergemaid polümeere, mis teeb selle kasutuse populaarseks kaalusäätlike toodete tootmise juures nagu autoduses, kus on kaalul oluline roll (*Ibid*). PP homopolümeeri tihedus ja kopolümeeri tihedus jäävad vahemikku 0,904 - 0,908 g/cm<sup>3</sup>. PP on tuleohtlik materjal (*Ibid*).

### 1.4.2 Polüeteentereftalaat

Polüeteentereftalaat ehk PET on üks enam taaskasutatud termoplastikuid ja sellest valmistatud tooted on 100% taaskasutatavad (SpecialChem, 2020b). See on väga vastupidav ja kerge, mis muudab selle transpordi lihtsamaks kui teistel analoogsetel plastikutel nagu näiteks PBT-l ehk polübutüleenereftalaadil (*Ibid*). PET vaik on tugev ja kerge, mis teeb sellest lihtsalt transporditava aine vaigu (*Ibid*). See omab häid gaasi- ja niiskustõkke omadusi ning seda saab kasutada laias temperatuuri vahemikus ( -60 kuni 130 °C) (*Ibid*). PET on purunemis- ja mõranemiskindel ning seda võib võrrelda klaasi asendusena (Karayannidis et al., 2005). PET sulamistemperatuur selle loomisel on 280 – 310 °C (SpecialChem, 2020b). PET plastikust loodud toodetel on peal märgis number 1. Seda kasutatakse päikesepaneelide loomisel ja autonduses (*Ibid*). Samuti luuakse PET plastikust tema omaduste tõttu ka joogipudeleid, sest see ei ima endasse vett ning suudab taluda vedeliku jäätumist pudelis ilma pudeli purunemiseta (Rytting, 2017).

PET-i puhul on töötatud välja meetod nende jäätmete käitlemiseks ringlussevõtu näol, minimeerides seeläbi uute ressursside kasutamist ning vähendades ka keskkonnaprobleeme (Shamsi et al., 2018). PET-jäätmete ringlussevõtuks kasutatakse üldiselt mehaanilisi ja keemilisi meetodeid (Hamad et al., 2013). Toodete valmistamine taaskasutatud plastist säästab 50–60% energiat võrreldes algse puhta plastitoormega, mis tuleneb esmatootmise ja ringlussevõtu energia erinevusest (Suh et al., 2000).

### 1.4.3 Kõrge tihedusega polüetüleen ja madala tihedusega polüetüleen

Kõrge tihedusega polüetüleen ehk HDPE on termoplast, mida on võimalik kasutada vastupidavaks pikaajaliseks hoiustamiseks (SpecialChem, 2020a). HDPE omab kõrget sulamistemperatuuri (120 – 140 °C) ja suurt tugevuse ja tiheduse suhet (0,93 – 0,97 g/cm<sup>3</sup>) (*Ibid*). Seda toodetakse madalal temperatuuril 70 – 300 °C ja rõhul 10 - 80 bari (*Ibid*).

Tavaliselt hoiustatakse HDPE-st vormitud anumates pesuvahendit, kloori või toiduaineid (näiteks piima) (Acme Plastics, 2021). Antud anumast on keeruline eemaldada tekkivaid lõhnu ja hoiustamisel tekkinud jääke (Sastri, 2014). HDPE on loodud turvaliseks, pikaajaliseks ning madalate hoolduskuludega plastikuks. (Acme Plastics, 2021) HDPE on vähem paindlik kui LDPE (Sastri, 2014).

Enamik HDPE kasutusest toimub jäikade pakendite tootmiseks (Emblem, 2012). Lisaks eelnevalt mainitud kasutusviisidele kasutatakse HDPE-d kaubaaluste, trumlite, kastide ja tööstuslike vahepakenditena (*Ibid*). HDPE-l on soodumus keskkonnast tulenevale stressimõradele, millele võib järgneda selle plastiku purunemine (*Ibid*). HDPE-d on hakatud kasutama vähem hügieenitarvete pakendamiseks, sest selles valdkonnas on hakatud eelistama PET plastikuid selle läbipaistvuse tõttu (*Ibid*). HDPE-d kasutatakse ka lühiajaliste toodete puhul korduvalt kasutatavate korkidena pudelitel ja šampoonidel, kuid ka selles valdkonnas on hakatud eelistama PP plastikut, kuna see ei purune nii palju kasutamise käigus (*Ibid*).

Madala tihedusega polüetüleen ehk LDPE on termoplast, mida kasutatakse steriilsete mullpakendite valmistamiseks ravimitööstuses (Sastri, 2014). See on kõrge läbipaistvusega, hea löögitugevusega ja omab kõrget vastupidavust rebenemise ja pingele vastu (*Ibid*). LDPE oli üks esimesi plastikuid, mida hakati kasutama laialdaselt tavakasutuses 1940-ndate lõpu poole (Selke & Hernandez, 2001). LDPE-l on hea õli ja kemikaali vastupidavus ja võrreldes HDPE-ga on LDPE-l oma madalama sulamistemperatuuri tõttu parem kasutada kuumuskindla kihina pakendites, kuid sellega kaasneb halvem soojusstabiilsus võrreldes HDPE-ga (*Ibid*). LDPE on oma olemuselt läbipaistvam kui HDPE (*Ibid*).

LDPE sulamistemperatuur (105 – 115 °C) on madalam kui HDPE-l ning ka tiheduse poolest ei ole LDPE nii tihe (0,91 - 0,94 g/cm<sup>3</sup>) (SpecialChem, 2020a). LDPE tootmine toimub temperatuuril 80 - 300 °C, kuid suure rõhu all, mille vahemikuks on 1000 - 3000 bar (*Ibid*). LDPE-d saab töödelda näiteks seda puhudes, süstides või kasutades ekstrusiooni meetodit (Dietrich et al., 2018).

LDPE on üks kõige enam kasutatud kaubapolümeere maailmas (Dietrich et al., 2018). Seda toodetakse 19 Mt aastas ja leiab peale ravimitööstuse laia kasutust ka toidupakendamisel, tarbekaupade pakendamisel ja mänguasjatööstuses (*Ibid*). 70% kogu LDPE-st ja LLDPE-st kasutakse ära kilena pakenditööstuses (Emblem, 2012).

#### **1.4.4 Teised plastikud**

Selle alla kuuluvad plastiku liigid, mis on koondatud ühe tähise alla (Mertes, 2020). Selleks tähiseks on toodetele märgitud number 7 ning tähistatud tekstiga *Other* (*Ibid*). Teist tüüpi plastiku hulka määratletakse akrüüli, polükarbonaati, polüaktiid kiudu, nailonit ja klaaskiudu (*Ibid*). Neid plastikuid üldiselt ei koguta ümbertöötlemiseks (Hahladakis & Iacovidou, 2018).

Teist tüüpi plastikust, peamiselt polükarbonaadist, tehakse lutipudeleid, veejahutus pudeleid ja kasutatakse autonduses (Seaman, 2012). Teist tüüpi plastikpakendite kasutamist soovitatakse vältida toidu ja joogipakenditena, kuna see võib eritada bisfenool A pakendatud toidu või joogi sisse (*Ibid*). Bisfenool A võib kahjustada inimese hormoonsüsteemi (*Ibid*). Bisfenool A on kasutusel polükarbonaadi tootmisel (National Institute of Environmental Health Sciences, 2020).

Polükarbonaat on tugev ja kergesti vormitav termoplastik, kuid seda ei saa kasutada orgaaniliste lahustitega koos nagu atsetoon ja ammoniaak, sest see pole keemiliselt nii inertne nagu teised plastikud (Wu et al., 2013). Meditsiinis kasutatakse polükarbonaati optikaga seotud rakendusteks (*Ibid*). Polükarbonaat on paindlik ja murdumiskindel (McKeen, 2019). Niiskus üksinda polükarbonaadi omadusi ei mõjuta, kuid UV kiirgusega koos viib see polükarbonaadi läike kadumiseni, hägustumiseni ning muudab ka plastiku rabedaks (*Ibid*). Selle kaitseks on polükarbonaadil mitmesuguseid katteid, mis aitavad neid probleeme vältida (*Ibid*).

Nailoni nimetust kasutatakse paljude polümeeride kohta, mis on loodud siidi asendusaineks (Gobbato, 2019). Nailon on tugev materjal, mis suudab hoida üleval suurt kogust massi vastavalt nailoni tüübile ilma purunemata (*Ibid*). Nailoni sulamistemperatuur on 250 °C ja see ei ole mürgine (*Ibid*). Nailonit on hakatud kasutama 3D trükkimisel selle vastupidavuse tõttu, kuid kõrge temperatuuri tõttu see ei ole nii levinud (*Ibid*). Nailonit kutsutakse ka polüamiidiks ning on tuntud ka oma gaasitõkestamise omaduste poolest (Brody, 2014). Nailon on teatud määral hügrokoopne, mis tähendab seda, et niiskuse korral selle gaasi tõkestamise omadused vähenevad (*Ibid*). Nailonit saab termiliselt vormida ning seda omadust kasutatakse ära liha pakendamisel, sest see vähendab hapnikku pakendi sees pikendades liha säilivusaega (*Ibid*).

#### **1.4.5 Keskkonnasõbralik plastik**

Keskkonnasõbralik plastik jaguneb üldiselt kolme kategooriasse (Raddadi & Fava, 2019). Eristatakse orgaanilistest materjalidest nagu maisitärklis valmistatud bioplasti ja biomassiallikatest, mille hulka kuuluvad taimsed rasvad, tapiokk ja piim valmistatud plastikuid (Srinivasa Rao et al., 2021). Keskkonnasõbralike plastikutena määratletakse ka plaste, mis on valmistatud traditsioonilisest naftakeemiast, kuid need sisaldavad lisandeid, mis päikesevalguse ja hapniku olemasolu korral kiiremini lagunevad (*Ibid*). Ka ringlusse võetud plastid, mis on sisuliselt plastijäätmete ringlussevõtu teel valmistatud plastid määratletakse keskkonnasõbralikena (*Ibid*). Praegu on eelkõige

teraviljadest saadavad polüsahhariidid need materjalid, mida klassifitseeritakse kui tulevikuplastide tooraineid (Sangeetha Devi et al., 2019).

Bioloogiliselt lagunevad plastikud on plastikud, mis lagundatakse veeks, süsihappegaasiks või metaaniks ja biomassiks (Plastics Europe, 2017) bakterite, seente, vetikate ja mullaelustiku poolt (Raddadi & Fava, 2019). Lagunemise kiirus sõltub tingimustest, kuhu bioloogiliselt lagunev plastik satub ning lagunemisel on oluline roll temperatuuril, ajal, mikroorganismide olemasolul, toitainetel, hapnikul ja niiskusel (European Environment Agency, 2020). Bioloogiliselt lagunevat plastikut kasutatakse toiduainete pakendamiseks, ostukottideks ja teisteks põllumajanduses kasutatavateks toodeteks (Oever et al., 2017). Samuti saab kasutaja seda kompostida (*Ibid*).

Bioplastideks loetakse plastikuid, mis vastavad standarditele (Kriipsalu et al., 2016). Need standardid on vastavalt riikidele erinevad ning tähendab seda, et erinevates regioonides on bioloogiliselt lagunevad plastikud erinevad (*Ibid*). Euroopa Liidus olev bioplastiku standard EVS-EN 13432:2003 määratleb bioplastikuna plastiku, millel peab 90 päevaga lagunema 90 % biolagunevast materjalist (*Ibid*). USA standard ASTM 6400 kehtestab, et lagunema peab 60 % biolagunevast materjalist 180 päevaga (*Ibid*).

Bioplastide lagunemine toimub fotolagunemise teel, mis tähendab, et UV-kiirguse tagajärjel lõhutakse polümeeriühendeid (Krzan et al., 2006). Mehaaniline lagunemine on lagunemine, mis jõu toimele lõhub plastikut väiksemateks tükkideks (*Ibid*). Termiline lagunemine toimub soojuse abil, mis annab vajaliku energia süsiniku oksüdeerimiseks (*Ibid*). Oksüdatiivne lagunemine käib tavaliselt koos termilise- või fotolagunemisega koos ja sisaldab endas hapniku abil lagunemist (*Ibid*). Hüdrolüütiline lagunemine toimub hüdrolüüsivaste ainete olemasolul. Bioloogiliselt lagunemine toimub mikroorganismide toimele (*Ibid*).

Märkimist väärib, et kõik bioplastid ei ole võimelised täielikult biolagunema ning need ei pruugi laguneda ka kiiremini kui traditsioonilised fossiilkütustel põhinevad plastikud (Srinivasa Rao et al., 2021). Küll on võimalik leida kirjandusest viiteid, et suurem osa tähtselt põhinevatest bioplastidest on võrreldes teistel toormetel põhinevate bioplastidega kergemini lagunevad (Broeren et al., 2017).

## 1.5 Meditsiinilised maskid

Ühekordsed näomaskid on toodetud polümeeridest nagu polüpropüleen, polüuretaan, polüakrüülnitriil, polüstüreen, polükarbonaat, polüetüleen või polüester (Selvaranjan et al., 2021). Maskid koosnevad kolmest kihist, millest esimene on pehme sisemine kiht, keskmine filtri kiht ning välimine veekindel ja värvitud kiht, mis tavaliselt on värvitud siniseks, nagu on välja toodud ka joonisel 1.4 (*Ibid*).



Joonis 1.4 Kirurgilise maski ristlõige (Autori foto).

Maskide kasutamise suurenemine on toonud inimeste keskkonda ja veeringesse plastikut ja mikroplastikut (Fadare & Okoffo, 2020). See võib omakorda põhjustada kanalisatsiooniummistusi ning mõjutab vee imbumist pinnasesse ja piirab põllumajanduslikku tegevust eriti arengumaades (Patrício Silva et al., 2021). Kasulik ei ole ühekordseid maske ka prügilasse ladestada, sest seal võivad need laguneda alla 5mm osakesteks, mida kvalifitseeritakse kui mikroplastikut (Fadare & Okoffo, 2020).

Maskide kasutamine viiruste ning teiste haigustekitajate leviku piiramise meetodina on toonud kaasa ülemaailmse maskide puudujäägi ning samaaegselt tootmise suurenemise (World Health Organization, 2020). Maailma tervise organisatsioon (WHO) prognoosis, et Covid-19 juhtumitele reageerimiseks on vaja 89 miljonit meditsiinilist maski iga kuu juhtumitele reageerimiseks (*Ibid*).

Igakuine maskide kasutamise hulk on ülemaailmselt 129 miljardit (Kalina & Tilley, 2020). Covid-19 levikuga suurenesid haiglates meditsiiniliste jäätmete hulgad, Hiinas Hubei provintsis tõusis meditsiiniliste jäätmete hulk 370 % (Klemeš et al., 2020). Samuti on meditsiiniliste maskide tootmine tõusnud Hiinas 116 miljoni maskini päevas (Parashar & Hait, 2021).

Hetkel kasutatakse meditsiinimaskidest vabanemiseks põletamist, sest põletusahjud on levinud ja põletamine on bioloogiliselt turvaline meetod viiruse hävitamiseks (Sangkham, 2020). Põletusahju olemasolu puudumisel arengumaades kasutatakse autoklaavimise meetodit, mille järel maskid ladestati prügilasse (*Ibid*). Meditsiinilisi maske on võimalik kasutada aluspinnase kihtideks kui seda segada taaskasutatud betooniga ning arvestades maskide plastilist koostist, siis on võimalik sama plastidega teha (Saberian et al., 2021).

## **1.6 Nitriilkindad**

Nitriil on sünteetiline kopolümeer, mis moodustub akrüülnitriili ja butadieeni kombineerimisel (Staples, 2018). Nitriilkinda olelustusükkel algab kummipuu kummina (*Ibid*). Sellele järgnevad erinevad ümbertöötlemisprotsessid seni kuni tekib nitriilmaterjal (*Ibid*). Nitriilkinnaste valmistamine oli kallim kui latekskinnaste tootmine, kuid tehnoloogia arenguga on suudetud kulud minimaliseerida (*Ibid*). Nitriilkindad on vastupidavad, veekindlad ja madala allergia määraga, mis teeb sellest populaarse toote töökeskkondades, kus on vajadus kaitsekindaid kasutada (*Ibid*).

Covid-19 pandeemia levikuga on nitriilkinnaste kasutus ülemaailmselt tõusnud ligi 65 miljardi kindani ühes kuus (Kalina & Tilley, 2020). Nitriilkindad moodustavad enamiku jäätmetest, mis tekivad laboratooriumites ning peaksid minema prügilasse ladestamisele ning see omakorda suurendab prügila maa-ala suurust (Mishra et al., 2019). 2019. aastal on nitriilkinnaste taaskasutamisega tegelema hakanud Inglismaa ettevõtte Spontex, mis on teinud võimalikuks ümber töödelda nitriilkindad põrandaplaatideks, spordiradade kateteks ja teisteks pinnase kattemarjalideks, jahvatades ühekordseid kindaid peeneks pulbriks (Spontex UK Ltd, 2019).



## 1.7 Pelletid

Üks võimalus reoveesette kasutamiseks oleks lisada sellele teisi jäätmeid ning muuta need kompaktsaks ja kergesti transporditavaks tooteks (Speight, 2020). Selle muutmiseks on efektiivne viis kasutada pressimasinat, mille järel muutuksid need jäätmed pelletiteks, mida oleks lihtsam transportida ja kergem ka kütteks kasutada (*Ibid*). Pelletite puhul peab jälgima nende veesisaldust, tuhasust, niiskuskindlust, neelduvust ja struktuurilist vastupidavust (*Ibid*). Vastavalt sellele, millega reoveesetet segatakse, oleneb, palju vajab töötlemist lisatav jääde (*Ibid*). Pelletite tegemisel on oluline lisatava materjali osakeste suurus (*Ibid*). Väiksemate osakeste korral jäävad pelletid tugevamad ning ei pudene käitlemisel kasutamatauteks tükkideks (Harun & Afzal, 2016). Pelletite toomine koosneb neljast erinevast etapist: toorainete kuivatamine, peenestamine, pelletite pressimine ja jahutamine (Vares et al., 2005).

## 1.8 Kütteväärtus

Kütteväärtus on füüsikaline suurus, mis näitab soojust ehk teatud koguse kütuse täielikul põlemisel tekkivat soojushulka (Velling & Vaasma, 2012). Mida madalam on süsiniku oksüdatsioonaste, seda suurem on kütteväärtus, mis tähendab, et kütuse kütteväärtus sõltub süsiniku oksüdatsioonastmest (*Ibid*).

Reoveesette termilise kuivatamise ja põletamise järel on saadud 10 % veesisalduse puhul vähemalt 15 MJ/kg kohta (Järve Biopuhastus OÜ, 2018). Võrdluseks võib välja tuua halupuidu, mille niiskusesisaldus on võrdne või väiksem kui 12 %, mille tarbimisalane kütteväärtus on 14,76 MJ/kg (Kukk, 2018). Tabelis 1.3 on väljatoodud erinevate kütuste kütteväärtused.

Tabel 1.3 Kütteväärtused.

<b>Kütus</b>	<b>Kütteväärtus MJ/kg</b>
Reoveesete	~15 MJ/kg (Järve Biopuhastus OÜ, 2018)
Põlevkivi	7,5-18,8 MJ/kg (Vainola, 2015)
Kivisüsi	21,28 MJ/kg (Virkus, 2014)
Halupuit	14,76 MJ/kg (Kukk, 2018)

## 1.9 Tuhasus

Tuhasus on oluline parameeter, mida mõõdetakse labori tingimustes vastavate ainetega analüüse tehes (Hanania et al., 2019). Tuhk on järele jääv tahke aine, mis tekib peale igasuguse kütuse põlemist (*Ibid*). Kõige enam levinud on puidupõlemisel tekkiv tuhk ja kivisöe põletamisel tekkiv tuhk (*Ibid*). Tuhk tekib ka mittetäielikul põlemisel ning tuha hulk varieerub suurel määral põletatava aine keemilisest kompositsioonist (*Ibid*). Mittetäieliku põlemise korral jääb puudu hapnikust, et viia kütuse põletamine lõpuni (*Ibid*). Selle tulemusena tekib tahm (*Ibid*). Tuha peamine koostisosa on süsinik ja selle teised koostisosad varieeruvad vastavalt sellele, mis kütust põletati (*Ibid*). Tuhk ja põlevosa, ilma niiskusega, moodustavad kütuse kuivaine (Vares et al., 2005). Mida suurem on tuhasuse suurus aines, seda madalam on selle kütteväärtus (Szymajda & Łaska, 2019).

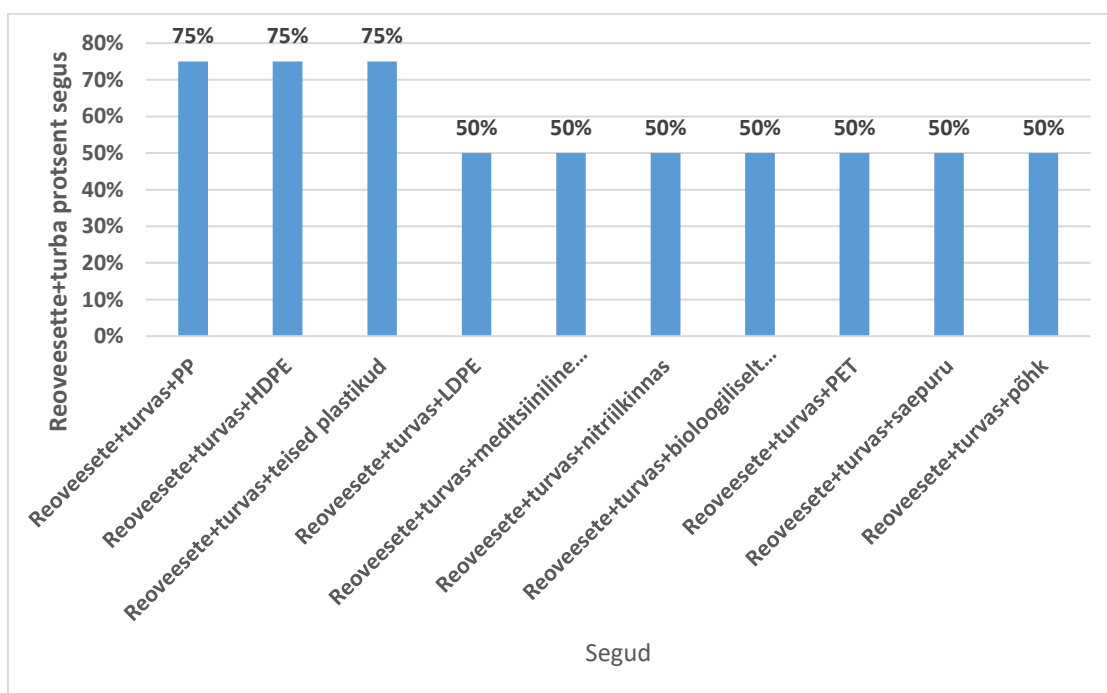
## 2 MATERJAL JA METOODIKA

Käesoleva magistritöö raames põletati kalorimeetrit kasutades erinevaid jäätmeid – reoveeset, põhku, turvast, saepuru, eri liiki plastikuid, nitriilkindaid ja meditsiinilisi kaitsemaske, et selgitada välja, milline on antud materjalide kütteväärtus ning kuidas on loetletud materjalidest võimalik segada maksimaalse kütteväärtusega segusid.

### 2.1 Töö materjal

#### Reoveesete

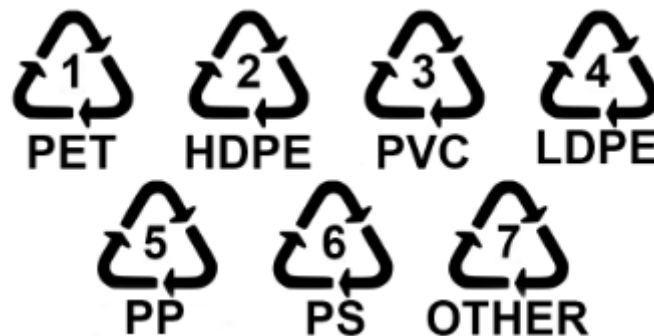
Töös kasutatav reoveesete pärineb ettevõttest AS Tartu Veevärk. Reoveesete segati turbaga (saadi AS Tartu Jõujaamast) vahekorras üks ühele (1:1) ning seda segu kasutati põhjana teiste segude loomiseks. Segusid, millega katsetama asuti iseloomustab joonis (joonis 2.1), kus on näha ka reoveesete ja turba protsentuaalne osakaal segudes.



Joonis 2.1 Katses osalenud materjali segudes asetsenud reoveesete ja turba 1:1 segu protsentuaalne osa.

## Plastpakendid

Iga pakend määrati tuginedes rahvusvahelisele plastpakendite visuaalsele märgistussüsteemile (joonis 2.2 (Rethink Waste, 2019)). Plastpakendite jäätmetest olid kasutusel polüeteentereftalaat (PET), polüpropüleen (PP), madala tihedusega polüetüleen (LDPE), kõrge tihedusega polüetüleen (HDPE), teised plastikud (*Other*) ja bioloogiliselt lagunev plastik. Polüvinüülkloriidi (PVC) ja polüstüreeni (PS) kasutamisest antud katse puhul otsustati loobuda, sest nende põletamisel eraldub tervist kahjustavaid ühendeid.



Joonis 2.2 Plastpakenditel kasutatavad plasti tüüpi näitavad märgised (Rethink Waste, 2019).

## Muud materjalid

Kuna kogu maailmas valitses katse läbiviimise ajal COVID-19 pandeemiast tekitatud olukord, lisati katsetamiseks reoveesettele ka laialdast kasutust leidvaid isikukaitsevahendeid – kasutamata nitriilkindaid ning kasutamata meditsiinilisi kaitsemaske. Lisaks kasutati biomassi materjalidest põhku ja saepuru, et langetada põletamisega niiskusesisaldust.

## 2.2 Töö metoodika

Töö metoodika baseerub EVS-ISO 1928:2016 standardil „Tahked mineraalsed kütused. Ülemise kütteväärtuse määramine kalorimeetrilise pommi meetodil ja alumise kütteväärtuse arvutamine,“ (Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus, 2016). See standard on loodud mineraalsete kütuste põlemissoojuse määramiseks konstantse ruumala ja etalontemperatuuril 25°C juures kalorimeetrilises pommis (Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus, 2016). Meetod põhineb kaalutud proovi põletamisel kõrgel rõhul oleva hapnikuga kalorimeetrilises pommis (*Ibid*). Efektive soojusmahtuvus on määratud kalorimeetria kalibreerimistestide jooksul (*Ibid*). Kalorimeetria protseduurid koosnevad kahest osast, millest üks on kalibreerimistest

boorhappega, ning teised testid on uurimiseks võetud vastavate kütustega, milleks üldiselt on kivisüsi või koks, kuid selle uurimistöö käigus kasutati teisi eelnevalt mainitud materjale (*Ibid*).

Käesoleva töö katsed viidi läbi Tallinna Tehnikaülikooli Inseneriteaduskonda kuuluvas Tartu kolledži tööstusökoloogia laboris antud töö autori poolt 2021. aasta veebruaris ja märtsis. Töö oli jagatud etappideks.

## **2.3 Tööprotsess**

### **1. Materjalide ettevalmistamine**

Esmalt valmistati ette töö materjalid. Katseks kasutatud materjalid (v.a plastijäätmed, maskid ja nitriilkindad) kuivatati kuivatuskapis 105 °C kraadi juures 24 tundi. Kuivatatud reoveesette ja turba segu uhmerdati peeneks massiks. Saepuru ja põhk jahvatati veskis MF 10 basic IKA (IKA-Werke, Saksamaa). Veski pöörete kiirus oli 4250 rpm ning põhu peenestamise jaoks kasutati 1 mm filtrit, mis muutis põhu piisavalt väikesteks osakesteks, et materjaliga oleks võimalik tablette pressida. Saepuru jaoks kasutati kõigepealt 3 mm filtrit ning seejärel 1 mm filtrit. Plastikud töödeldi manuaalselt kääridega, peenestades materjali katsetopsides võimalikult peeneks, et oleks võimalik tablette pressida. Samuti määrati kõikide teiste katses osalevate materjalide kuivaine ja tuhasus.

### **2. Kuivaine määramine**

Kuivaine määramiseks fikseeriti kaaluga Mettler PC 440 (Mettler Toledo, Saksamaa) materjalide algkaal ning paigutati materjalid portselanist tiiglites kuivatuskappi Memmert (Memmert GmbH + Co. KG, Saksamaa). Materjale kuivatati 24 tundi temperatuuril 105 °C kraadi. Pärast kuivatamisprotsessi materjal jahutati eksikaatoris, materjal kaaluti ja arvutuslikult leiti kuivaine protsent kasutades selleks valemit 2.1, mis on järgmisel lehel.

$$\left(\frac{M_a}{M_k}\right) \cdot 100\%, \text{ kus} \quad (2.1)$$

$M_a$  – mass peale kuivatamist, g

$M_k$  – mass enne kuivatamist, g

### 3. Tuhasisalduse määramine

Tuhasuse määramiseks kaaluti iga materjal kahes korduses portselanist tiiglitesse, mis paigutati kompaktsesse kiudisolatsiooniga muhvelahju Linn High Therm mudel LM-112 (Linn High Therm, Saksamaa). Antud ahju maksimaalne töötemperatuur on kuni 1200 °C (Linn High Therm, 2021), kuid tuhasisalduse määramiseks teostati põletamisprotsess nelja tunni jooksul temperatuuril ~525 °C kraadi. Pärast nelja tundi muhvelahjus, proovid jahutati eksikaatoris ning kaaluti järele jäänud tuhk kaalul Mettler PC 440 (Mettler Toledo, Saksamaa). Tuhasuse arvutamiseks kasutas autor valemit 2.2.

$$\left(\frac{T_{mp}}{T_{ma}}\right) \cdot 100\%, \text{ kus} \quad (2.2)$$

$T_{mp}$  – tuha kaal, g

$T_{ma}$  – materjali kaal enne tuhastamist, g

### 4. Kalorimeetria

Materjalide kütteväärtus määrati kalorimeetriga CAL3K-AP (Digital Data Systems (Pty) Ltd., Lõuna-Aafrika Vabariik), mis on järgmisel lehel väljatoodud joonisel 2.3. CAL3K-AP kalorimeeter kasutab isotermilise ja adiabaatilise meetodi kombinatsiooni kuival meetodil. Minimaalne määramisaeg proovi puhul on kuni 5 minutit. Välist hapnikuallikat ei ole eraldi tarvis, sest pomm täidetakse kalorimeetri sees automaatselt hapnikuga ja automaatselt toimub ka rõhu jälgimine. (DDS Calorimeters, 2016)

Kütteväärtuse mõõtmiseks pressiti mehaanilise pressiga materjalidest või segatud materjalidest tabletid, mille kaal jäi vahemikku 0,3 – 0,7 grammi. Selline kaalu vahemik on valitud materjali hulga ja tootjapoolse manuaali tõttu, et materjali põlemisel tekkiv temperatuuri tõus oleks võrdne kalibreerimismaterjali põlemisel tekkiva temperatuuri tõusuga (ASTM International, 2009).

Igast materjalist tehti segu reoveesette ja turbaga. Segu segati spaatliga ning valati tabletivormi, mille järel tabletivorm pandi pressi alla ning pressiti tabletiks. Tableti valmimisel tuli see pintsettidega asetada kalorimeetrilise pommi tiiglisse ning asetada puuvillast niiti ümber süüetraadi nii, et niidi mõlemad otsad jääksid tableti alla. Sellele järgnes kalorimeetrilise pommi paigutamine õhkjahutisse, kus see viidi sobiva temperatuurini. See järel asetati see kalorimeetrisse ning kaane sulgemisel sisestati proovi kaal klaviatuuri kasutades masina kasutajaliidesesse. Edukal põletamisel kalorimeeter kuvas ekraanile saadud näidud. Mitte edukal põletamisel kuvas kalorimeeter ebaõnnestumise signaali ning avas kaane. Kütuse põletamise ebaõnnestumise põhjuseks oli puuvillase niidi ära nihkumine tableti alt kalorimeetrilise pommi käitlemise ajal. Enamik juhtudel kui põletamine ebaõnnestus oli võimalik puuvillane niit uuesti fikseerida nii, et mõlemad otsad jäid tableti alla, kuid oli ka juhtumeid, kui ebaõnnestunud põletamisel hävinesid nii puuvillane niit ja ettevalmistatud materjal, mis olid tiiglisse paigutatud. Peale igat põletamist pidi kalorimeetrilise pommi asetama õhk jahutisse, kus see jahutati käitlemiseks sobiva temperatuurini.



Joonis 2.3 Kalorimeeter CAL3K-AP ja kalorimeetrilised pommid (Autori foto).

Igast materjalist tehti kolm põletamist ning tulemuseks saadi kütteväärtus MJ/kg kohta. Iga katsepäev kontrolliti kalorimeetri töökorras olekut sertifitseeritud standardmaterjaliga, milleks oli boorhape, mille kütteväärtuse on määratud tootja poolt 26,44 MJ/kg ideaalsetes tingimustes. Materjali paigutus tiiglis on välja toodud joonisel 2.4. Edukal põlemisel kuvas kalorimeeter tulemuse ekraanile. Kalorimõõtja kasutas põletamiseks hapnikku. Tulemused esitatakse pomm kütteväärtusena (proov sisaldab nii niiskusesisaldust kui tuhka).



Joonis 2.4 Standardmaterjali asetsemine kalorimeetrilise pommi tiiglis (Autori foto).

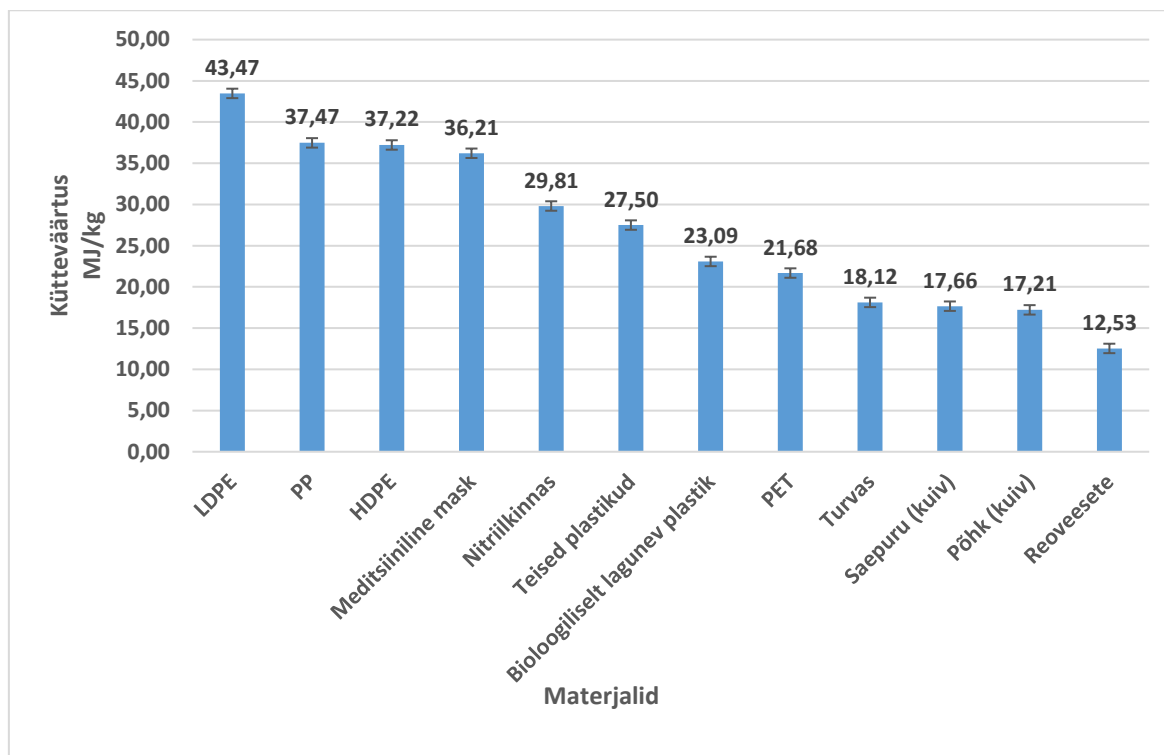


## **Andmete analüüs**

Saadud katseandmete analüüsimiseks kasutati programmi Microsoft Excel. Sellega koostati joonised ning erinevad diagrammid. Tabelite koostamiseks ja teksti osa vormistamiseks kasutati Microsoft Word tarkvara.

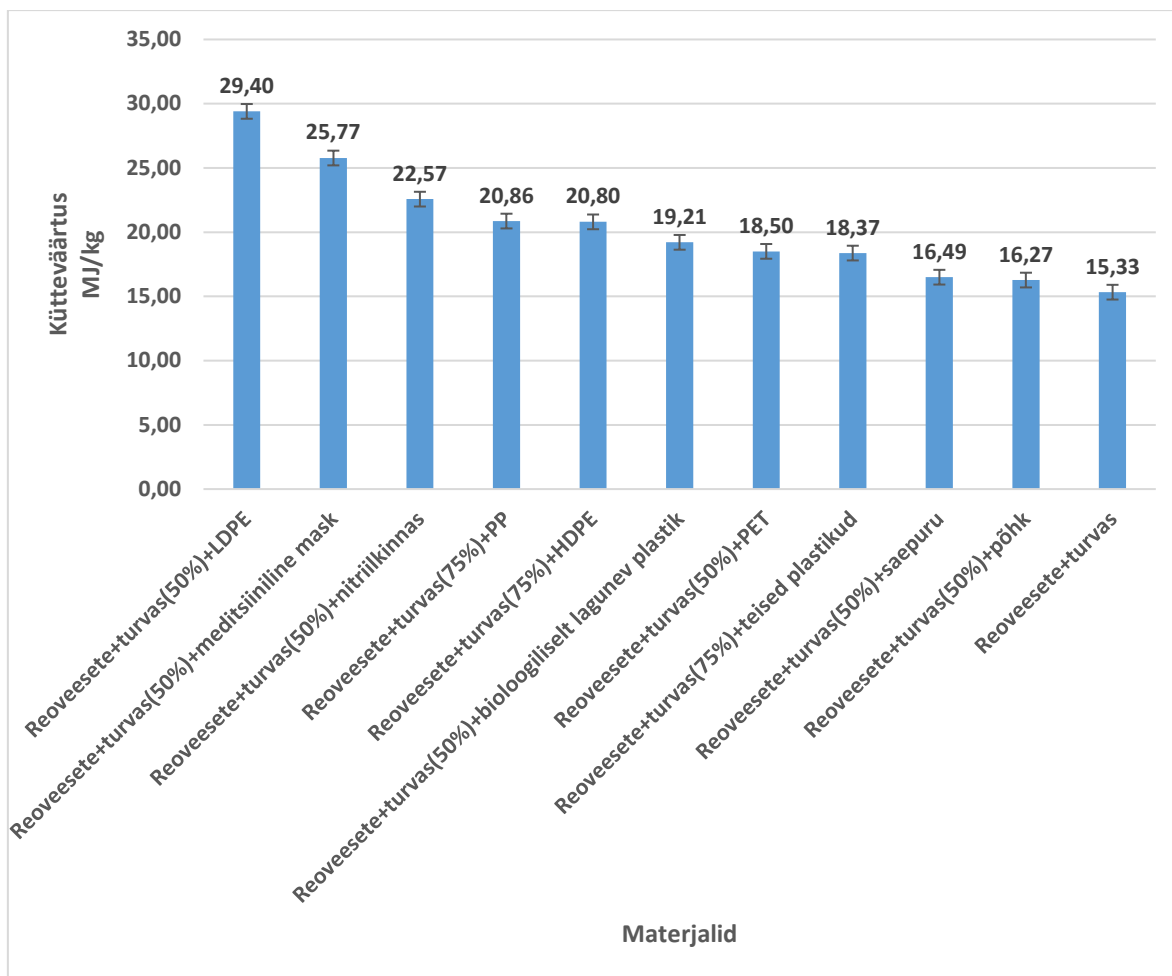
## 3 TULEMUSED

### 3.1 Materjalide kütteväärtused



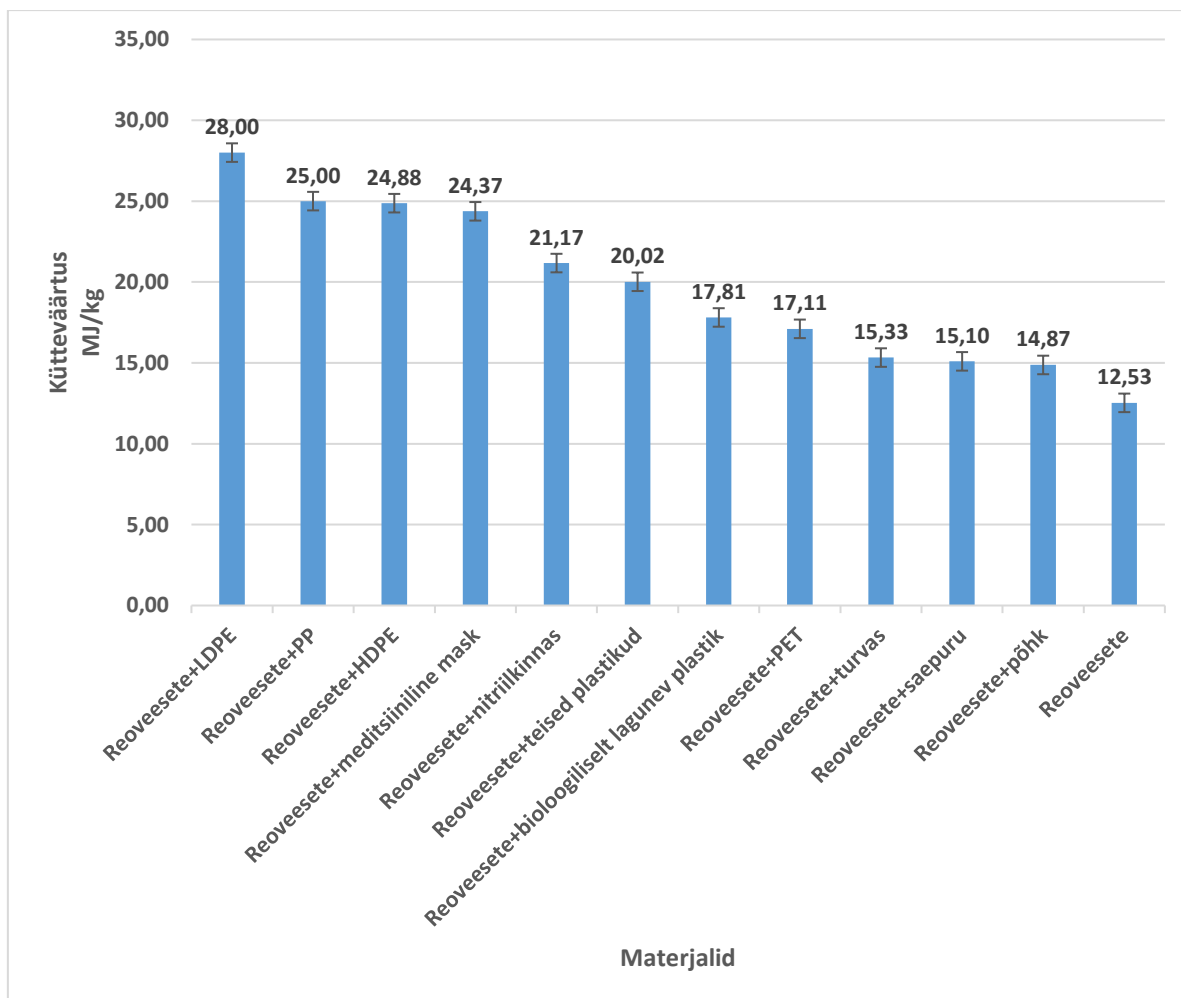
Joonis 3.1 Materjalide kütteväärtus esitatuna koos keskmise veaga.

Materjalide kütteväärtuste jooniselt 3.1 selgub, et kõige suurema kütteväärtusega materjal oli madala tihedusega polüetüleen (LDPE), mille kütteväärtus oli 43,47 MJ/kg. Selle põhjenduseks võib olla peaaegu olematu niiskusesisalduse protsent, olles alla 1 % nagu on toodud välja joonisel 3.11, mis näitab materjalide niiskusesisalduse protsenti. Kõige madalam kütteväärtus oli reoveesetel, milleks oli 12,53 MJ/kg ning see omab kõige kõrgemat niiskusesisalduse protsenti (umbes 40 %). Põhu, saepuru ja turba kütteväärtused olid sarnased, olles üle 17 MJ/kg, kuid jäädes alla 19 MJ/kg. Samuti on nendest tulemustest näha plastikute kõrge iseseisev kütteväärtus, kus kõik plastikud puhtalt põledes omavad kütteväärtust üle 21 MJ/kg. Polüetüleenitereftalaadi (PET) kütteväärtus on plastikute seast kõige madalam, mille kütteväärtus oli 21,68 MJ/kg. Polüetüleenitereftalaadi (PET) puhul satub seda ilmselt põletusse vähem puhtal kujul, kuna see on 100% taaskasutatav ning põletamine ei ole selle puhul esmane käitlusvõimalus.



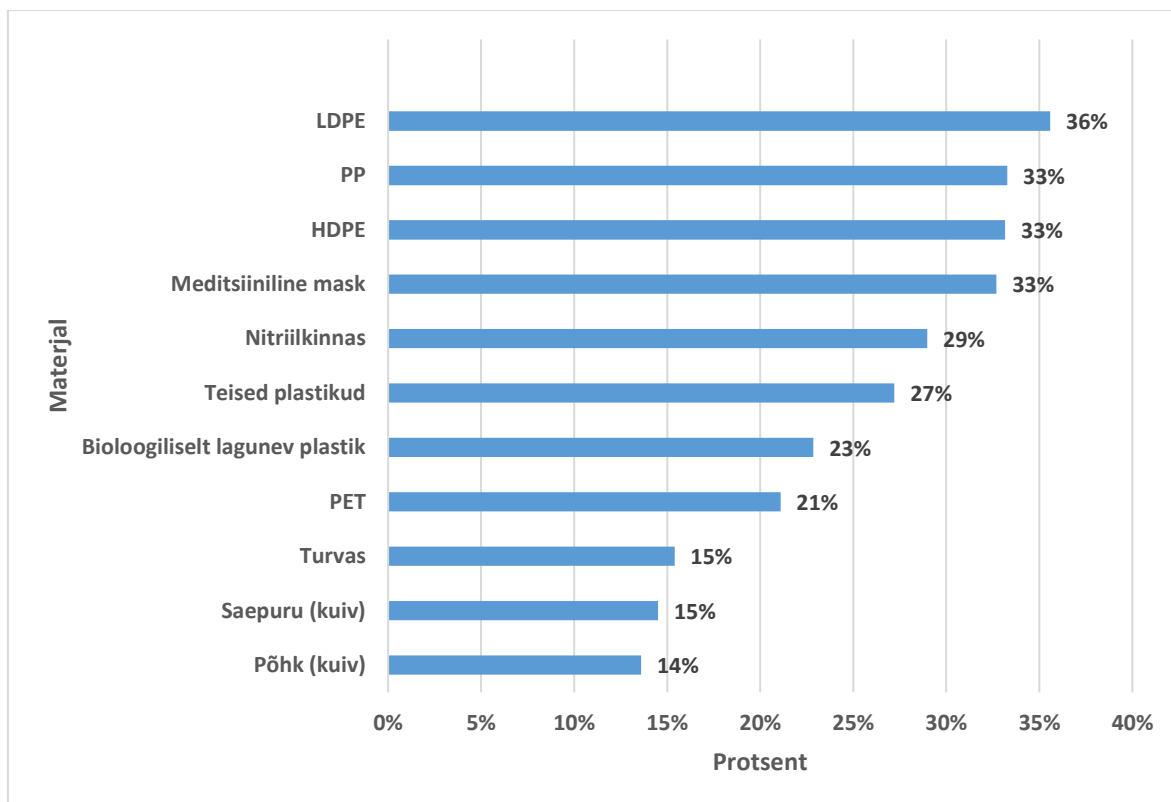
Joonis 3.2 Mõõdetud segude keskmised kütteväärtused esitatuna koos keskmise veaga.

Mõõdetud kütteväärtuste keskmised (joonis 3.2) tulemused saadi reaalseste mõõtmiste järgselt. Reoveesette ja turba segule lisatud plastikud ja teised materjalid tõid materjalide puhast kütteväärtust olulisel määral alla, kuid tõstsid reoveesette tulemust, mis teeb selle kasutamise efektiivsemaks. Kõige kõrgema kütteväärtuse säilitas sellise koosluse juures reoveesette ja turba segamine madala tihedusega polüetüleeniga (LDPE), millega saavutati kütteväärtus 29,40 MJ/kg. Selle põhjuseks võib olla LDPE peaaegu olematu niiskusesisaldus, iseseisev kõrge kütteväärtus ja ka madal tuhasus. Kõige madalamat kütteväärtust segude hulgas omas reoveesette ja turba segu, mille keskmiseks kütteväärtuseks saadi 15,33 MJ/kg. Selle põhjuseks võib olla kõrge niiskusesisaldus nii reoveesetel kui ka turbal, reoveesette kõrge tuhasus ja reoveesette ja turba iseseisvalt madalad kütteväärtused.



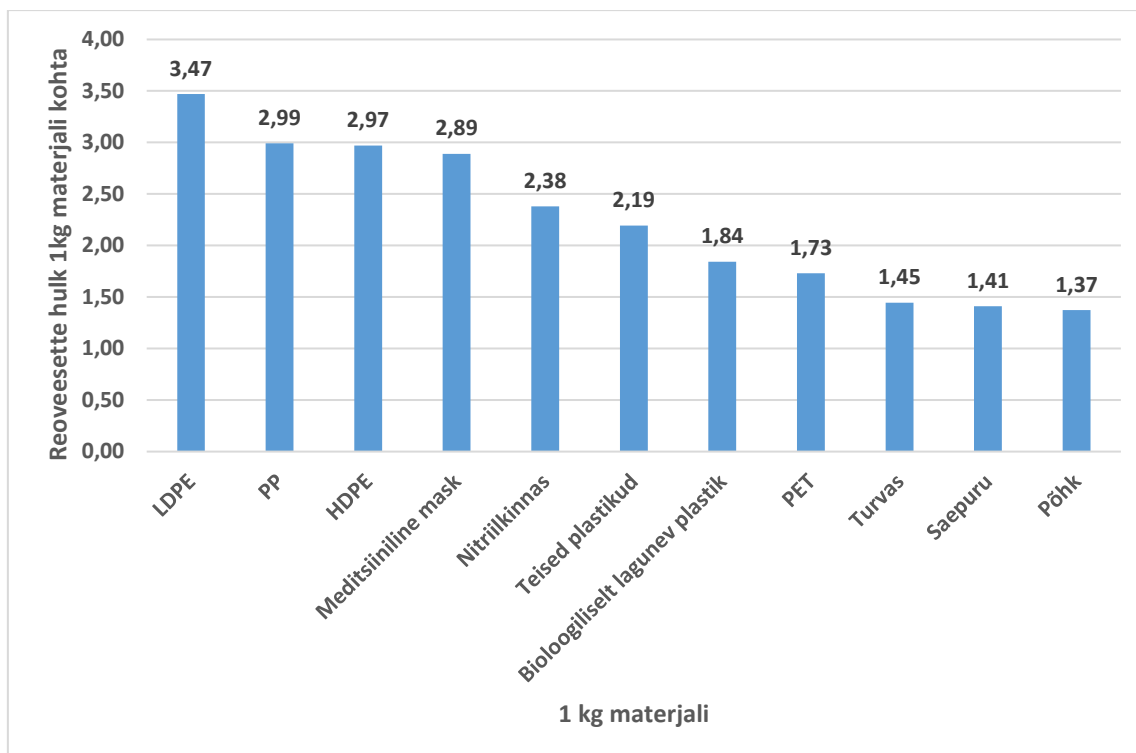
Joonis 3.3 Keskmised materjali segude kütteväärtused koos keskmise veaga.

Antud joonisel 3.3 on arvatatud kõik segud puhtalt 50% vahemikes ning kõige kõrgemad kütteväärtused säilitasid reoveesete segu LDPE-ga ja reoveesete segu polüpropüleeni (PP). Kõige suurema kütteväärtuse 1:1 seguna saavutas LDPE kütteväärtusega 28,00 MJ/kg. LDPE, PP, HDPE ja meditsiiniliste maskide lisamisel reoveesetele võib reoveesete kütteväärtust suurendada ligi 2 korda. Samal ajal lisades reoveesetet looduslikele alusainetele tekib langus maksimaalselt 2,79 MJ/kg kohta. Need segud on konkureerivad halupuiduga ja on kõige madalamate kütteväärtustega segud. Turba, saepuru ja põhuga segamisel saadud kütteväärtused jäävad kõik alla 16 MJ/kg. See joonis näitab arvutuslikul teel saadud segude kütteväärtuse tulemusi, mis oleks saavutatav katses osalenud materjalide reaalsete niiskussisalduste ning tuhasuste korral.



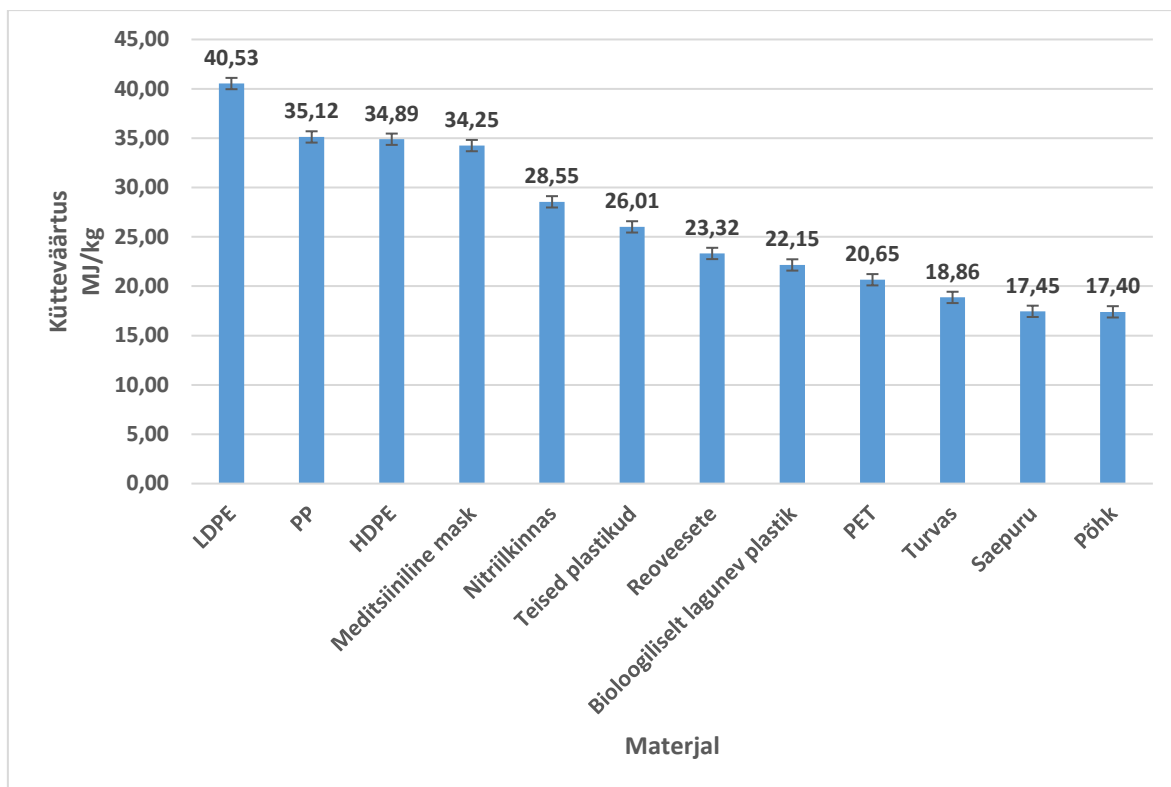
Joonis 3.4 Kütteväärtuse kaotus reoveesette lisamisel 50% koguse juures.

Võrreldes LDPE kütteväärtust segatuna reoveesetega selgub, et LDPE kütteväärtus langes 36% reoveesette lisamisel, kuid reoveesette kütteväärtus LDPE lisamisega tõuseb ligi 123%. Joonisel 3.4 on välja toodud, et kõige vähem kütteväärtust plastikutest oma esialgse kütteväärtusega võrreldes kaotas PET plastik ning kaotuse suuruseks oli 21%. Kõige suuremateks kaotajateks olid LDPE ja PP. Kõige vähem kaotasid turvas, saepuru ja põhk, mille kütteväärtuse protsentuaalne kaotus oli alla 15%. PP kaotas 33%, HDPE 33% ja ka meditsiiniline mask kaotas 33% oma iseseisvast kütteväärtusest. Sellelt jooniselt saab tuletada, milliseid segusid oleks kõige efektiivsem teha materjali reaalse niiskusesisalduste ja tuhasuste juures, et näha millisele materjalile oleks võimalik reoveesetet lisada ilma, et kaotaks suurt osa individuaalsest kütteväärtusest.



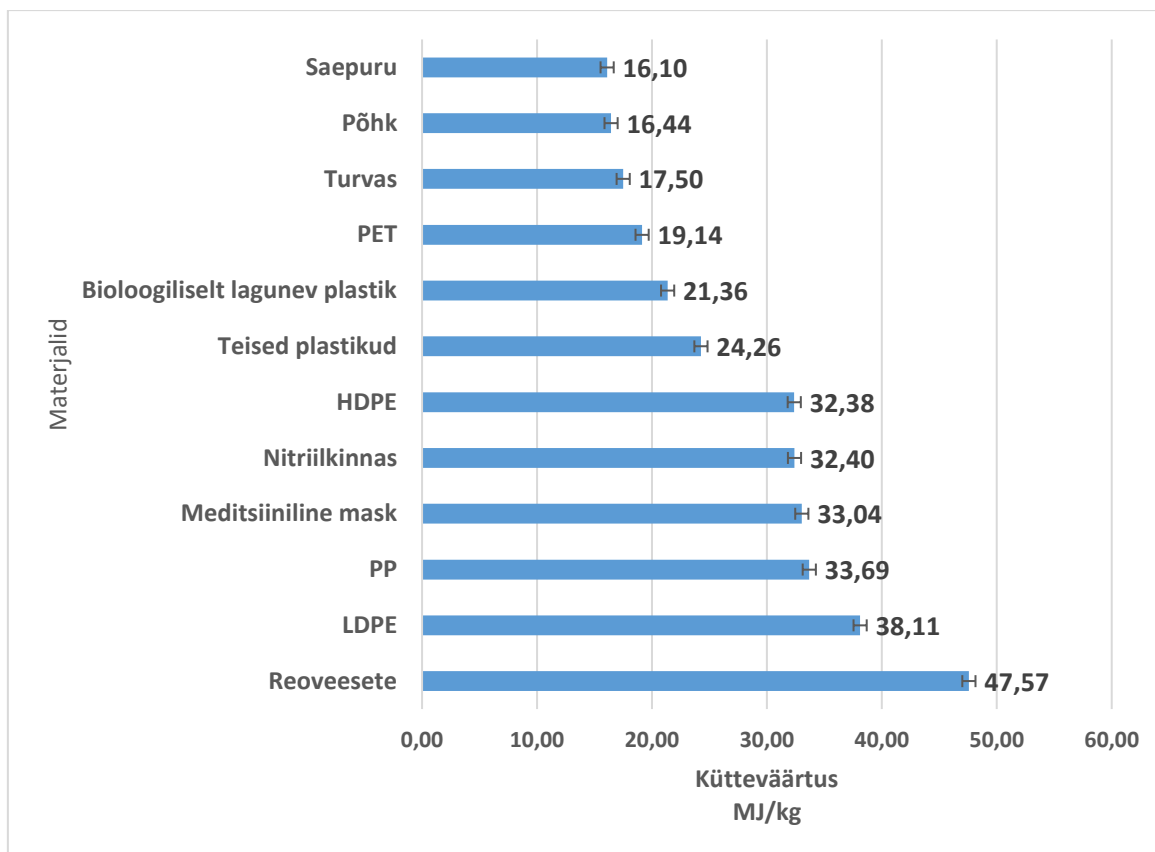
Joonis 3.5 Vajamineva reoveesette hulk, et saavutada sama kütteväärtus 1 kg katses osalenud materjali kohta.

Jooniselt 3.5 on näha vaja mineva reoveesette hulka, et saavutada kütteväärtus, mis oleks võrdne materjali iseseisva kütteväärtusega. Soovides saavutada sama kütteväärtust nagu madala tihedusega polüetüleeni (LDPE) peab põletama 1 kilogrammi LDPE kohta ära 3,47 kilogrammi reoveesetet autori andmete põhjal. Polupropüleeni (PP) kütteväärtuse puhul vastab 1 kilogrammi antud materjali kohta 2,99 kilogrammi reoveesetet. HDPE kütteväärtuse saavutamiseks on vaja 2,97 kilogrammi reoveesetet. Meditsiinilise maski puhul läheb vaja 2,89 kilogrammi reoveesetet. Nitrilkinda põletamisel on 1 kilogrammiga võrdne 2,38 kilogrammi reoveesetet. 1 kilogrammi teiste plastikute puhul on reoveesetet võrdsustamiseks vaja 2,19 kilogrammi. Biolaguneva plastiku puhul on 1 kilogrammiga võrdne 1,84 kilogrammi reoveesetet. PET puhul on võrdne 1 kilogrammiga 1,73 kilogrammi reoveesetet. Turba, saepuru ja põhu puhul on 1 kilogrammiga võrdne alla 1,45 kilogrammi reoveesetet.



Joonis 3.6 Kütteväärtus fikseeritud 7% niiskusesisaldusega.

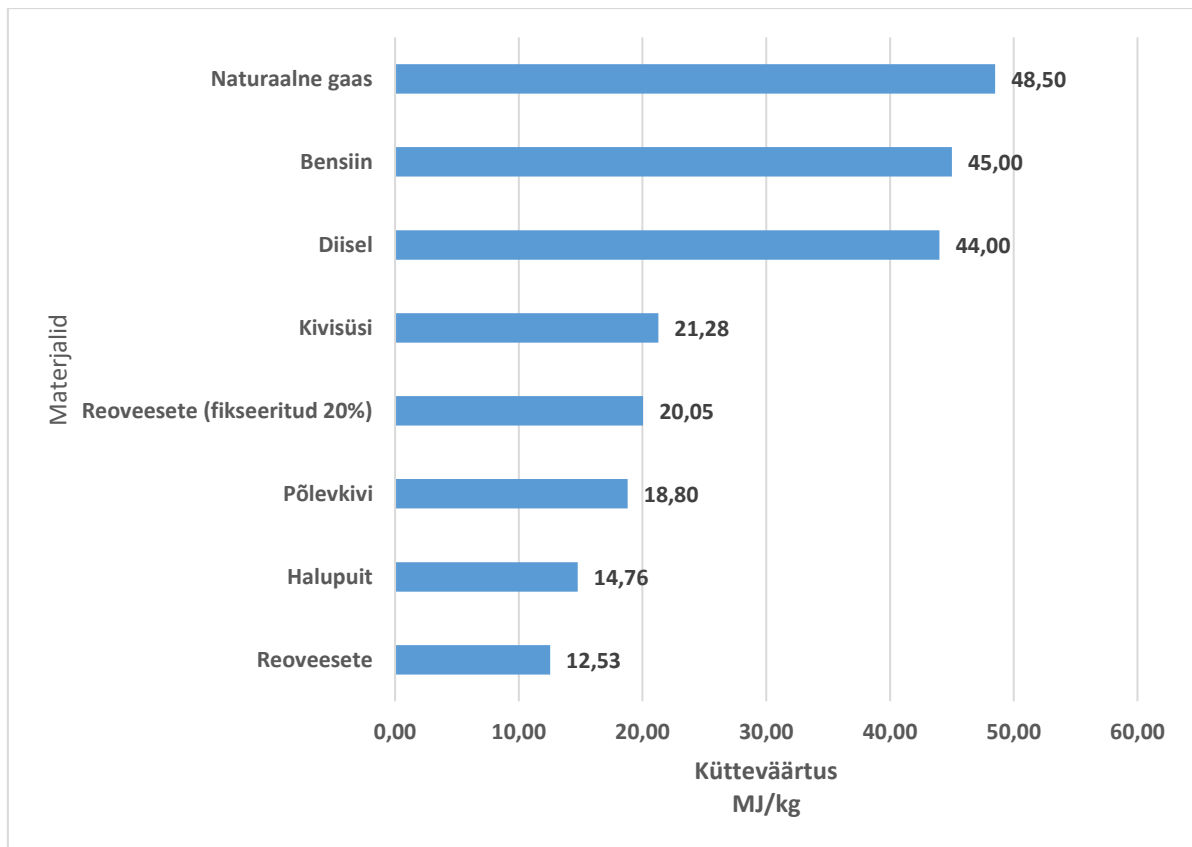
Antud joonisel 3.6 tuleb välja see, kui kõikidel materjalidel oleksid fikseeritud ja samastatud niiskusesisaldused, siis saavutaks reoveesete senisest kõige suurema kütteväärtuse. Teised materjalid on jätkuvalt küll samas järjestuses ning LDPE omab kõrgema niiskusesisaldusega jätkuvalt kõige kõrgemat kütteväärtust. Reoveesete sellise niiskusesisalduse juures on tunduvalt konkurentsivõimelisem ning võrreldes tabelis 1.3 väljatoodud kütteväärtustega omab kõrgemat kütteväärtust kui näiteks kivisüsi. Antud protsentuaalne väärtus sai valitud kõigi kütteväärtuste keskmise tulemusena.



Joonis 3.7 Kütteväärtus fikseeritud niiskusesisalduse (7%) ja fikseeritud tuhasuse (7,93%) puhul.

Arvutatud kütteväärtus fikseeritud niiskusesisalduse ja tuhasuse näitude põhjal toob välja selle, et reoveesete oleks võimeline olema kõige suurema kütteväärtusega materjal, kuid reaalsuses pole selliste näitajate saavutamine reoveesete puhul võimalik või on väga kulukas. Selliste fikseeritud näitude puhul jäid suur osa katses osalenud materjalide tulemused suuremate muutusteta, kuna need omavad paremaid näitajaid, kui on keskmisteks võetud. Joonisel 3.7 on näha, et enamik muutuseid jäid  $\sim \pm 5$  MJ/kg hulka kui välja arvata reoveesete muutused. Antud protsentuaalne fikseeritud tuhasuse väärtus sai valitud kõigi tuhasuste keskmisena.

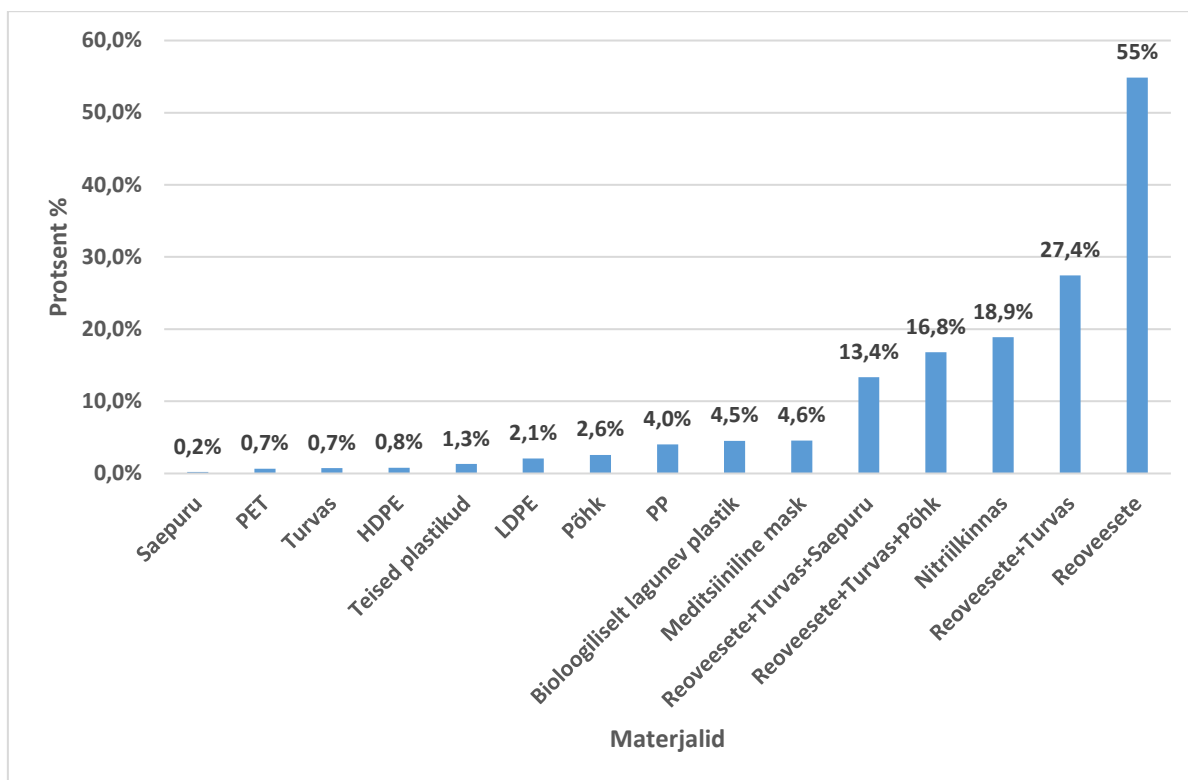




Joonis 3.8 Levinud kütuste kütteväärtuste võrdlus reoveesetega (Kukk, 2018; Vainola, 2015; Virkus, 2014; World Nuclear Association, 2021).

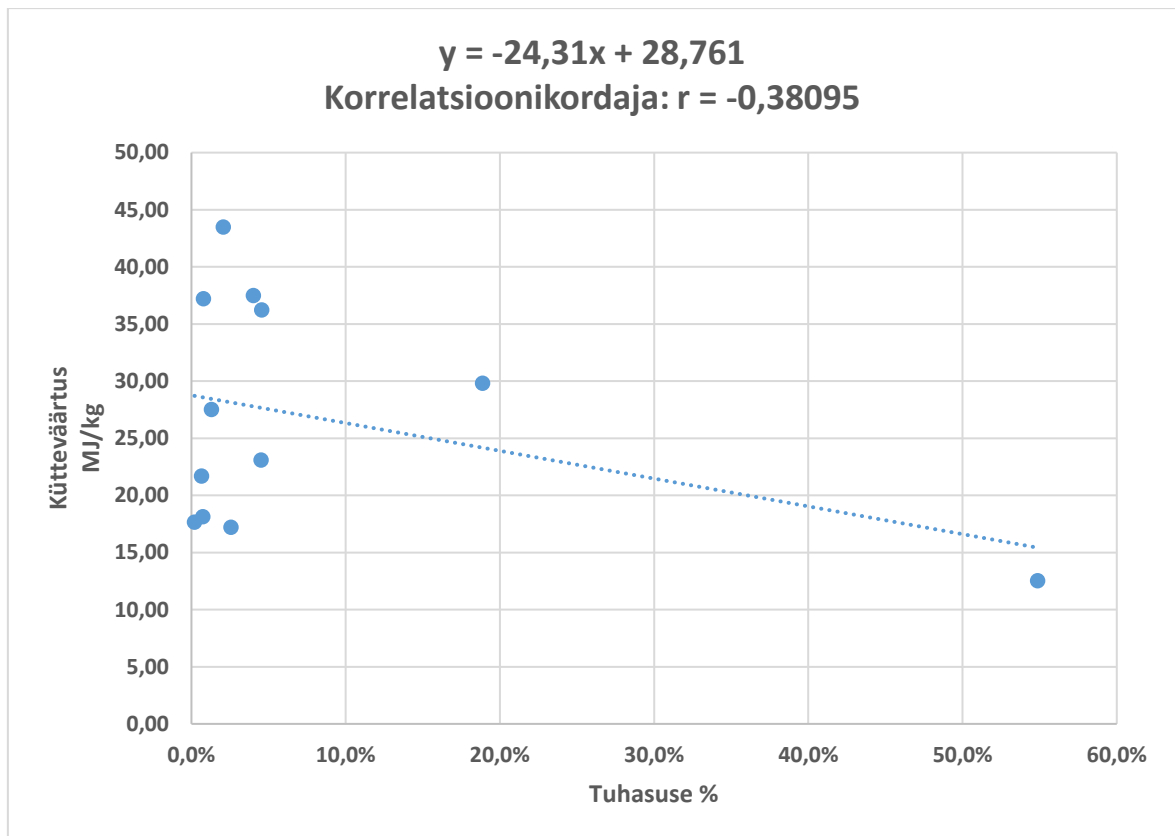
Antud joonisel 3.8 on väljatoodud reoveesete kütteväärtuse võrdlus teiste laialt levinud kütustega. Sellelt tabelilt tuleb välja võrdlus, et katses osalenud reoveesete ei ole konkureeriv teiste küttematerjalide ja kütustega ning konkureerivaks saaks reoveesete, kui seda kuivatatakse väga kuivaks. Viies reoveesete niiskussisalduse arvutuslikult kuiva reoveesete tasemeni ehk 20%-ni, annab see kütteväärtuseks 20,05 MJ/kg, mis oleks kõrgem põlevkivist ja halupuidust.

## 3.2 Materjalide tuhasus



Joonis 3.9 Materjalide tuhasuse protsent.

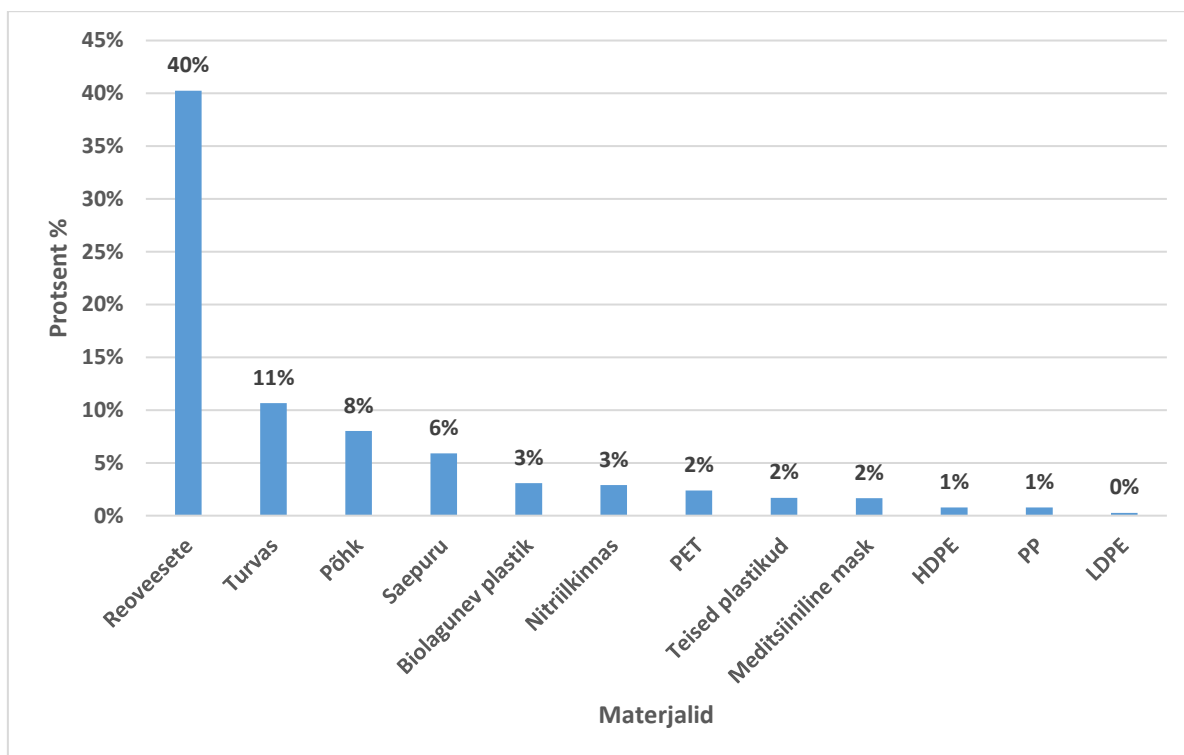
Antud joonisel 3.9 on välja toodud, mitu protsenti ainet muhvelahjus põletamisel alles jäi. Kõige puhtamalt põles ära saepuru, mille tuhasus oli 0,2%. Kõige rohkem jäi jääki alles kõigil juhtudel, kus põletati reoveesetet. Reoveesete puhul ei saadud ühelgi juhul tuhasuse protsenti alla 13% ning arvutuslikult jääb reoveesetet alles 55% põletavast kogusest. Samuti oli suure tuhasuse protsendiga ka nitriilkinnas, millel jäi põlemata 18,9% muhvelahju asetatust kogusest. Sellest saab järeldada, et reoveesete tuhasus on tunduvalt kõrgem võrreldes teiste katses osalenud ainetega välja arvatud nitriilkinnas.



Joonis 3.10 Korrelatsioon kütteväärtuse ja tuhasuse vahel.

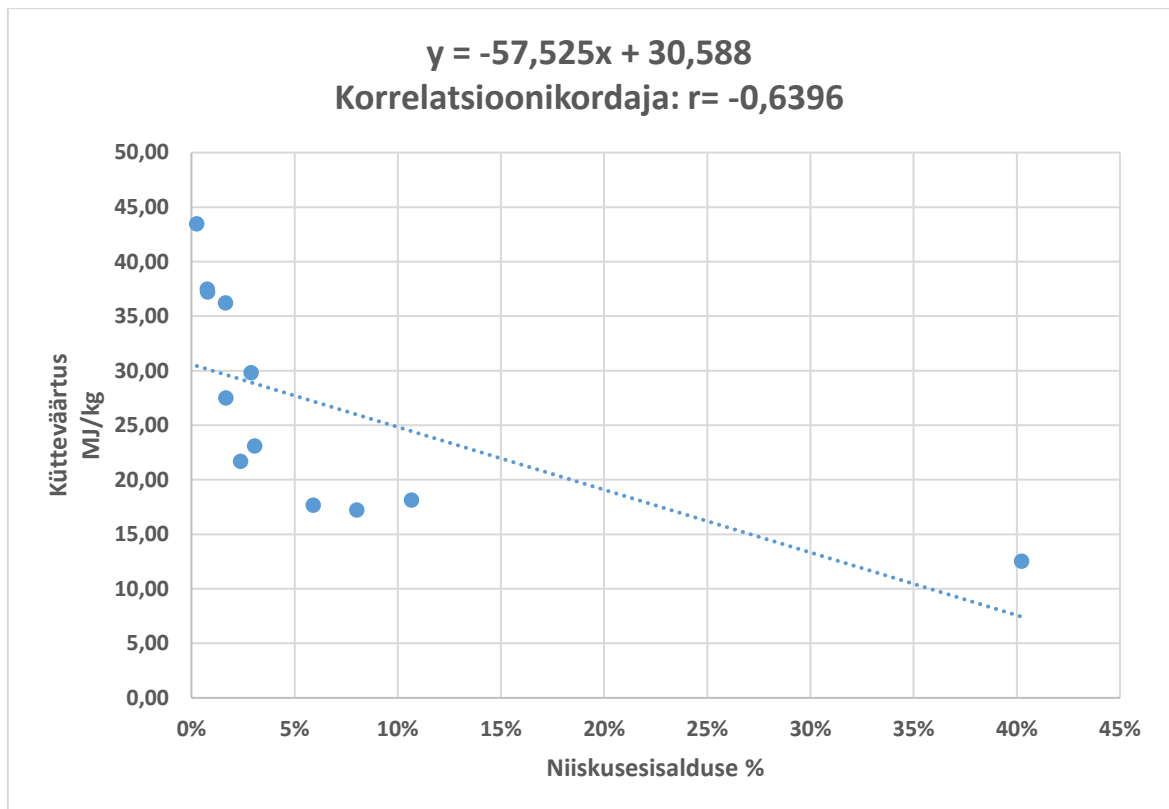
Antud joonisel 3.10 on näha tuhasuse korrelatsioon kütteväärtusega, milleks saadi korrelatsioonikordaja  $-0,38095$ . See jääb  $-0,3$  ja  $-0,7$  vahele ning see tähendab, et on olemas keskmine seos tuhasuse ja materjalide kütteväärtuse vahel. Antud tulemustele toetudes saab väita, et tuhasusest sõltub kütteväärtus. Materjalide tuhasuse muutmisega on võimalik muuta vähesel määral materjalide kütteväärtust, kuid see ei ole kütteväärtuse tõstmise puhul kõige määravam osa. Sellegipoolest on jooniselt näha, et kõige kõrgemate kütteväärtuste puhul oli tuhasuse sisaldus  $0\%$  ja  $10\%$  vahel ning kõige madalam kütteväärtus oli kõige suurema tuhasuse puhul jäädes  $50\%$  ja  $60\%$  vahele.

### 3.3. Materjalide niiskusesisaldus



Joonis 3.11 Materjalide niiskusesisalduse protsent.

Joonis 3.11 näitab katses osalenud materjalide niiskusesisaldust, kus kõige rohkem niiskust sisaldas reoveesete ning kõige vähem niiskust sisaldas LDPE. Niiskusesisaldus on kõrgem kõigil orgaanilistel katses osalevatel ainetel. Plastikute niiskusesisaldus jäi 3,07 ja 0,26 protsendi vahele. Sellest saab teha järelduse, et reoveesete vajab kuivatamist, kui seda soovitakse kasutada kütusena ning see hoiab endas kõige rohkem niiskust võrreldes teiste katses osalenud ainetega. Jooniselt selgub ka see, et mida suurem on niiskusesisaldus, seda madalam on kütteväärtus, sest vähem energiat kulub aine süütamiseks, kuna kõrge niiskusesisaldusega materjalid ei põle nii hästi.



Joonis 3.12 Korrelatsioon niiskusesisalduse ja kütteväärtuse vahel.

Joonis 3.12 näitab arvutatud niiskusesisalduse korrelatsiooni kütteväärtusega, milleks saadi korrelatsioonikordaja  $-0,6396$  ning see tähendab, et on keskmine negatiivne seos niiskusesisalduse ja kütteväärtuste vahel. Keskmine seos tähendab seda, et korrelatsioonikordaja jääb  $-0,3$  ja  $-0,7$  vahele, millest saab järeldada, et niiskusesisaldus ja kütteväärtus mõjutavad üksteist – niiskusesisalduse vähenedes kütteväärtus suureneb ja vastupidi ehk niiskusesisalduse suurenedes väheneb kütteväärtus. Jooniselt on näha, et kütteväärtus on kõrgem, kui niiskusesisaldus on väiksem. Sellele joonisele toetudes saab väita, et mida väiksema niiskusesisaldusega materjali põletada soovitakse, siis seda kõrgemat kütteväärtust on võimalik saavutada. Samuti saab väita madalama niiskusesisaldusega materjalide eelistamist kütteks ja ka seda, mida madalamale suudetakse viia niiskusesisaldus, siis seda kõrgemat kütteväärtust saab konkreetne materjal pakkuda selle tarbijale.

## 4 ARUTELU

Käesoleva magistritöö raames uuriti reoveesette ja erinevate plastikujääkide kütteväärtuseid, niiskusesisaldusi ja nende ainete tuhasust ning võimalusi reoveesette ja plastikujääkide kombineerimiseks, vaadeldes katselisel ja arvutuslikul teel saadud kütteväärtusi nende segude kohta.

Reoveesette kütteväärtus ei ole konkurentsivõimeline tavapäraselt kasutuses olevate kütmiseks mõeldud materjalidega nagu näiteks kivisüsi ja halupuit (Kukk, 2018; Virkus, 2014). See tähendab, et iga kilogrammi halupuidu põletamisele peab põletama 15% rohkem reoveesetet, et saavutada sama kütteväärtus.

Konkurentsivõime tekib reoveesetel pärast selle segamist erinevate plastidega (joonis 3.3). Eelkõige saavutatakse kõrge kütteväärtus LDPE või PP segamisel. Kuna mõlemate plastide puhul on tegemist jäätmetega, mille taaskasutamine on probleemne, siis annab see ühe valiku reoveesette ja plastiku segu põletamiseks (Vanapalli et al., 2021). Nende plastide saamine on võrreldes puidu ning teiste traditsioonilisemate kütmiseks mõeldud tootetega odavam, sest nende teke, kasutus ja jõudmine jäätme staadiumisse on lühike võrreldes puidukasvuga ning näiteks söe kaevandamisega. Puidu ja söe olelusring võib küll olla lühem visuaalselt, kui neid kasutatakse vaid kütteks. Võrreldes plastikutega, mis läbivad olelusringi, pakkudes lühiajalist väärtust ja kasutust igapäevaelus, ning samal ajal jõudes jäätme faasi, kust edasi on üheks variandiks põletamisele suunamine. Ainult reoveesette põletamine jääb kütteväärtuse poolest alla põlevkivile, kiviööle, halupuidule, põhule, saepurule ja kõigile plastikutele, mis katsetes osalesid, kuid muutes reoveesette omadusi kas kuivemaks või tuhavaesemaks, oleks see võimeline konkureerima teiste kütustega.

Reoveesete ja turvas moodustasid enamuses segudes 50% kogu segust, mõningal juhul ka 75%, milleks olid PP, HDPE ning teised plastikud. Selle põhjuseks oli tablettideks pressimisel nende ainete mitte kokku jäävus madalama protsendi juures. See tähendab, et segades näiteks reoveesette ja turba segu HDPE plastikuga 50% juures, pudenes tablett kasutamatuks massiks, mida polnud võimalik katsetegemiseks kasutada. Antud tulemustest saab järeldada, et see materjal sobib kasutamiseks ainult peeneks jahvatatuna, kuid pigem võiks seda mitte kasutada, sest nii LDPE kui ka HDPE puhul saab nendest taaskasutada kilematerjali ja nii vältida uute ressursside kasutusele võttu.

Tuleb tõdeda ka plastikute iseseisvaid kõrgeid kütteväärtusi, mis saavutasid mitmel korral peaaegu neljakordseid tulemusi üle reoveesette kütteväärtuse, kuid enamjaolt jäid erinevused kahe kuni kolme kordseks. Reoveesette segudeks tegemisel, võrreldes

iseseisva plastikuga, langes kütteväärtus vähemalt 10 MJ/kg võrra plastikute puhul, kuid looduslikemate toormete puhul ainult 1-2 MJ/kg võrra. See tähendab, et reoveesetet plastikuga segades kütteväärtus muutub suuremal määral, kui looduslike toormetega segamisel. Samuti võrreldes plastikuid ja reoveesetet turbaga, on selge erisus nende tekkes, kuna turba aastane juurdekasv on tohutult väike, siis on efektiivne kasutada reoveesetet, mida ei suudeta kõike ära kasutada, ja plastikuid, mille iga aastane teke näitab ülemaailmselt tõusutrendi (Joosten & Couwenberg, 2008; Keskkonnaministeerium, 2017; Plastics Europe, 2015).

Veelgi selgub tulemustest see, et kui on vajadus tekkivat reoveesetet ära kasutada, mida pole võimalik suunata kuhugi mujale, ning pole võimalik olnud koguda ka puhast plastikut LDPE või ka teisi plastikujäätmeid (*other*), siis on kõige efektiivsem antud töö põhjal segada reoveesete 50% vahemikus orgaaniliste ainetega, milleks olid antud uuringus turvas, põhk ja saepuru. Sellise tegevusega on protsendiline kadu kõige väiksem ning see on konkureeriv tabelis 1.3 välja toodud kütteväärtustega (näiteks halupuit 14,76 MJ/Kg).

Hakates muutma reoveesette ja üleüldiselt materjalide niiskusesisaldust ja tuhasust, hakkab muutuma selle kütteväärtus väga suurel määral. Ka tulevad välja need põhimõtted lisaks autori saadud tulemustele kirjanduses (Szymajda & Łaska, 2019). Tulemustes on näha, kui fikseerida kõikide materjalide tuhasus ja niiskusesisaldus samale tasemele, muutuvad kütteväärtused nii halvemuse kui ka paremuse poole. See oleneb materjalide esialgsetest niiskusesisaldusest ja tuhasusest, mis tähendab, et kui on võimalik neid vähendada võrreldes esialgsete omadustega, siis kütteväärtus tõuseb ja kui suurendada esialgseid väärtuseid, siis kütteväärtus langeb.

Tulemustes on välja toodud ka korrelatsioonikordajad, mis tuhasuse puhul jäi -0,38095 juurde ja niiskusesisalduse puhul jäi korrelatsioonikordaja -0,6396 juurde. Nende kordajate puhul on tegemist mõlemal korral küll keskmise negatiivse seosega, mis jääb kirjanduses -0,3 ja -0,7 vahele, kuid niiskusesisalduse kordaja on kaugemal nullkorrelatsioonist (Sauga, 2020). See tähendab seda, et antud katses omas suuremat mõju kütteväärtusele niiskusesisalduse. Väljendudes kütteväärtuse suuremast langusest, mille põhjustas niiskusesisalduse tõus.

Katses analüüsitud reoveesete omas 40% niiskusesisalduse juures kütteväärtust 12,53 MJ/kg. Kui selle sama reoveesette kütteväärtus arvutada välja 10% niiskusesisalduse juures, siis oleks selleks hoopis 22,6 MJ/kg. Kirjanduses väljatoodud reoveesete näitajad 10% niiskusesisalduse juures omavad kütteväärtust 15 MJ/kg (Järve Biopuhastus OÜ, 2018). Sellest võib tuletada, et kütteväärtuste erinevus on ligi 34%. Kirjandusest tuleb välja ka andmeid, mis kinnitavad katses osalenud kuivatatud

reoveesette näitude asjakohasust, milleks on kütteväärtuste vahemik 11,10 – 22,10 MJ/kg, mis oleneb niiskusesisaldusest ja tuhasusest (Oladejo et al., 2018).

Veesisalduse kohapealt omab märg reoveesete niiskusesisaldust kuni 98% (Syed-Hassan et al., 2017). Kuid vee välja pressides ning reoveesetet tahendades on võimalik saavutada niiskusesisaldus 73 – 84 % (*Ibid*). Aja jooksul aurub sellest tahendatud reoveesetest alles jäänud vesi ära ja reoveesete muutub aina kuivemaks (*Ibid*). Kuivaks reoveesetteks loetakse alla 20 % niiskusesisaldusega reoveesetet ning poolkuivaks 70 – 45 % niiskusesisaldusega reoveesete, mis omakorda näitab fikseeritud niiskusesisalduse kates 7 % niiskusesisalduse saamise keerukust (*Ibid*). See tähendab, et kates osalenud reoveesete on oma niiskusesisalduse poolest rohkem poolkuiva reoveesette näitudega kui kuiva reoveesette näitudega, kuna see omab 40% niiskusesisaldust.

Plastikute kütteväärtused, tulenevalt kirjandusest, viitavad PP kütteväärtusele suurusega 30,90 MJ/kg ja tuhasusega 2,93 % (Unal et al., 2017). Autori kates saadi keskmiseks väärtuseks 37,47 MJ/kg ning tuhasus 4,01 % juures. See teeb nende erinevuseks 6,57 MJ/kg kütteväärtuste vahel ja tuhasuses 1,08 %. PET kütteväärtus kirjanduse põhjal on 21,81 MJ/kg kohta ja tuhasus 2,15% (Wasilewski, 2013). Materjalide põletamisel kalorimeetris saavutati kütteväärtus 21,68 MJ/kg ja tuhasus 0,67%. Nende vaheline erinevus kütteväärtuste puhul on 0,13 MJ/kg ja tuhasuse vahel 1,48 %. PET materjali peetakse kirjanduses heaks küttematerjaliks tuhasuse vähesuse tõttu ning soovitatakse seda kui põletada kütusesegudes madala kvaliteedilist sütt (Unal et al., 2017).

LDPE kütteväärtuseks on saadud vahemik 40,8 - 44,1 MJ/kg (Tsiamis & Castaldi, 2016). See annab hea võrdluse kates saadud kütteväärtusele, milleks oli 43,47 MJ/kg. Katse ja kirjandusest tuleneva arvu vaheks on 1,02 MJ/kg. HDPE kütteväärtuste vahemikuks on kirjanduses saadud 37,1 – 44,1 MJ/kg (Tsiamis & Castaldi, 2016). See samuti toetab kates saavutatud kütteväärtust 37,22 MJ/kg ning nende vaheks on saadud 3,38 MJ/kg. Teist tüüpi plastiku kütteväärtus saadi 40,7 MJ/kg (Tsiamis & Castaldi, 2016). Töö käigus läbiviidud katsetes saavutati kütteväärtus 27,50 MJ/kg, mis teeb kirjanduse ja katselisel teel saadud tulemuste vaheks 13,2 MJ/kg. Sellest võib järeldada, et teist tüüpi plastiku materjal võib varieeruda nii suurel määral ning võimalik, et autori materjal ei olnud nii kõrge kütteväärtusega plastikute segu kui oli kirjanduses kasutatud teist tüüpi plastik (Mertes, 2020).

Töö tulemusena saab järeldada, et reoveesetet ja plastikut segades on võimalik reoveesette kütteväärtust tõsta peaaegu 3 korda, kuid plastikuid eraldi kogudes ning neid eraldi põletades on nende kütteväärtused suuremad kui koos reoveesetega



põletades. Katse näitas, et olulisel kohal on niiskusesisaldus ja tuhasus, mida muutes on võimalik saavutada kõrgemaid kütteväärtuseid materjalide puhul ning mida kuivemat reoveesetet on võimalik põletada, seda konkurentsivõimelisena kütteväärtusega see materjal on. Samuti saab välja tuua, et kõige vähem kütteväärtust kaotavad looduslikud materjalid, mis teeb nendest kõige efektiivsemad küttematerjalid reoveesetega segamiseks.

## KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli uurida reoveesette rikastamist erinevate plastmaterjalidega, et leida, kas ning millisel määral on võimalik tõsta reoveesette kütteväärtust. Lisaks oli autor püstitanud uurimisküsimuse, et leida milline uuritavatest segudest oleks kütmiseks kõige efektiivsem oma kütteväärtuse poolest ning ka hüpoteesi, et mida suurem on plasti sisaldus küttesegus, seda kõrgem on segu kütteväärtus.

Materjalide kütteväärtustest selgub, et kõige suurema kütteväärtuse saavutas LDPE plastik nii puhtal kujul kui ka segatuna reoveesetega, kuid see plastik kannatas ka kõige suurema protsentuaalse kütteväärtuse languse all segatuna reoveesetega. Seega võib väita, et selle plastikuga saab kõige kõrgema kütteväärtuse, kuid see ei ole nii efektiivne kui segada reoveesetet orgaaniliste ainetega nagu turvas, põhk või saepuru, kus protsentuaalne kadu oli alla 16 %. LDPE kõrge kütteväärtuse põhjuseks on selle plastiku peaaegu olematu niiskusesisaldus alla 1 % ja väike tuhasus alla 3 %. Reoveesete oleks võimeline konkureerima sellise kütteväärtusega kui selle tuhasus ja niiskusesisaldus oleksid väiksemad kui nad reaalsuses on. Viies reoveesette niiskusesisalduse ja tuhasuse 7 % ja vastavalt 7,93 % juurde oli muutus märgatav ning kütteväärtus kõrgem kui LDPE-l.

Nendele küsimustele vastuste leidmiseks viis autor kogutud materjalidega läbi katsed, leidmaks materjalide niiskusesisaldust ühes korduses, tuhasust kahes korduses ja kütteväärtust kolmes korduses. Kõik katsed ja kaalumised viidi läbi Tallinna Tehnikaülikooli Tartu Kolledži laboris.

Uurimise tulemusteks saadi, et katsel osalevatest materjalidest kõige suurema kütteväärtuse saavutas puhtal kujul LDPE kütteväärtusega 43,47 MJ/kg. Samuti saavutas LDPE ka kõige kõrgema kütteväärtuse segatuna reoveesetega, milleks oli 28,00 MJ/kg kohta. LDPE oli ka kõige madalama niiskusesisaldusega materjal läbiviidud katses, saavutades niiskusesisalduse alla 1%. LDPE ja reoveesette segu oli kõige ebaefektiivsem segu, sest reoveesette lisamine LDPE-le viis kütteväärtuse alla 36% ulatuses. Kõige efektiivsem plastik, millega reoveesetet segada oli PET plastik, mille puhul viis reoveesetega segamine selle kütteväärtuse alla 21 % ulatuses. Kõige efektiivsem oli segada reoveesetet põhuga, sest reoveesete muutis põhu kütteväärtus 14% ulatuses väiksemaks.

Pandeemia tõttu meditsiiniliste maskide ja nitrilkindaste suurenenud kasutuse tõttu võeti katsesse ka need materjalid. Meditsiinilised maskid saavutasid puhtal kujul

kütteväärtuse 36,21 MJ/kg kohta ning nitriilkindad kütteväärtuse 29,81 MJ/kg kohta. Segudena saavutati meditsiiniliste maskide puhul kütteväärtus 24,37 MJ/kg ja nitriilkinnaste puhul kütteväärtus 21,17 MJ/kg.

Antud töös püstitatud uurimusküsimusele leiti vastus. Tulemuste põhjal saab teha järelduse, et reoveesette rikastamisel plastijääkidega on võimalik suurendada kütteväärtust mitmekordselt, kuid oleks efektiivsem kasutada katses olnud looduslikke materjale nagu turvas, saepuru ja põhk, sest nende kasutamisel ei kaotata nii suurt osa kütteväärtusest kui plastidega. Samuti leidis kinnitust ka hüpotees, et mida suurem on plasti sisaldus küttesegus, seda kõrgem on segu kütteväärtus. Töö eesmärk sai täidetud ja reoveesette kütteväärtust on võimalik tõsta plastmaterjalidega ning kõige suurema kütteväärtuse andis LDPE ja plastidest kõige efektiivsema kütteväärtuse PET.

## SUMMARY

The aim of this master's thesis was to study the enrichment of sewage sludge with different plastic materials in order to find out whether and to what extent it is possible to increase the calorific value of sewage sludge. In addition, the author had asked a research question to find which of the studied mixtures would be the most efficient for heating in terms of its calorific value, and also the hypothesis that the higher the plastic content in the heating mixture, the higher the calorific value of the mixture.

The calorific values of the materials show that the highest calorific value was achieved by LDPE plastic both in its pure form and mixed with sewage sludge, but in addition, this plastic suffered the largest percentage decrease in calorific value when mixed with sewage sludge. Thus, it can be said that this plastic has the highest calorific value, but it is not as effective as mixing sewage sludge with organic substances such as peat, straw or sawdust, where the percentage loss was less than 16%. The high calorific value of LDPE is due to the almost non-existent moisture content of less than 1% and the low ash content of less than 3%. Sewage sludge would be able to compete with its calorific value if its ash content and moisture content were lower than they actually are. The change in the moisture content and ash content of the sewage sludge to 7% and 7.93%, respectively, was noticeable and the calorific value was higher than that of LDPE.

To find answers to these questions, the author performed experiments with the collected materials to find the moisture content of the materials in one repetition, ash content in two repetitions and calorific value in three repetitions. All experiments and weighings were performed in the laboratory of Tallinn College of Tallinn University of Technology.

The results of the study showed that the highest calorific value of the materials participating in the experiment was achieved by pure LDPE with a calorific value of 43.47 MJ / kg. LDPE also achieved the highest calorific value when mixed with sewage sludge, which was 28.00 MJ / kg. LDPE was also the material with the lowest moisture content in the test, reaching a moisture content of less than 1%. The mixture of LDPE and sewage sludge was the most inefficient mix, as the addition of sewage sludge to LDPE reduced the calorific value by almost 36%. The most efficient plastic for mixing sewage sludge was PET plastic, where mixing with sewage sludge reduced its calorific value by less than 21%. It was most effective to mix the sewage sludge with straw because the calorific value of the sewage sludge was reduced only by 14%.

Due to the pandemic, the use of medical masks and nitrile gloves has been on the rise, so these materials were also included in the experiment. Medical masks reached the

calorific value of 36.21 MJ / kg in pure form and nitrile gloves the calorific value of 29.81 MJ / kg. As mixtures, the calorific value was 24.37 MJ / kg for medical masks and 21.17 MJ / kg for nitrile gloves.

Based on this work, it can be concluded that enrichment of sewage sludge with plastic residues is possible and it can increase the calorific value by a significant amount, but it would be more efficient to use natural materials such as peat, sawdust and straw because they do not lose as much calorific value as plastics. The hypothesis that the higher the plastic content in the heating mixture, the higher the calorific value of the mixture was also confirmed. The calorific value of sewage sludge can be increased with plastic materials, and LDPE gave the highest calorific value and PET the most efficient calorific value of plastics. The aim of this study was fulfilled.

## KASUTATUD KIRJANDUS

- Acme Plastics. (2021). *What is High Density Polyethylene?*  
<https://www.acmeplastics.com/what-is-hdpe>
- Alamia, A., Ström, H., & Thunman, H. (2015). Design of an integrated dryer and conveyor belt for woody biofuels. *Biomass and Bioenergy*, *77*, 92–109.  
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.03.022>
- Antwi-Boasiako, C., & Acheampong, B. B. (2016). Strength properties and calorific values of sawdust-briquettes as wood-residue energy generation source from tropical hardwoods of different densities. *Biomass and Bioenergy*, *85*, 144–152.  
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.12.006>
- AS Tootsi Turvas. (2020). *Kütteturvas*. <https://www.tootsiturvas.ee/kutteturvas/>
- ASTM International. (2009). *ASTM D240-09*.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1520/D0240-09>
- Bajpai, P. (2018). Wood and Fiber Fundamentals. In *Biermann's Handbook of Pulp and Paper* (pp. 19–74). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814240-0.00002-1>
- Benson, N. U., Bassegy, D. E., & Palanisami, T. (2021). COVID pollution: impact of COVID-19 pandemic on global plastic waste footprint. *Heliyon*, *7*(2), e06343.  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06343>
- Brody, A. L. (2014). Packaging of Foods. In *Encyclopedia of Food Microbiology: Second Edition* (pp. 1017–1027). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384730-0.00244-5>
- Broeren, M. L. M., Kuling, L., Worrell, E., & Shen, L. (2017). Environmental impact assessment of six starch plastics focusing on wastewater-derived starch and additives. *Resources, Conservation and Recycling*, *127*, 246–255.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.001>
- Cai, L., Krafft, T., Chen, T. Bin, Gao, D., & Wang, L. (2016). Structure modification and extracellular polymeric substances conversion during sewage sludge biodrying process. *Bioresource Technology*, *216*, 414–421.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.102>
- Cascone, S., Rapisarda, R., & Cascone, D. (2019). Physical Properties of Straw Bales as a Construction Material: A Review. *Sustainability*, *11*(12), 3388.  
<https://doi.org/10.3390/su11123388>
- Caslin, B., & Finnan, J. (2010). *Straw for Energy*.  
[https://www.teagasc.ie/media/website/publications/2010/868\\_StrawForEnergy-1.pdf](https://www.teagasc.ie/media/website/publications/2010/868_StrawForEnergy-1.pdf)
- Cornaro, C., Zanella, V., Robazza, P., Belloni, E., & Buratti, C. (2020). An innovative

- straw bale wall package for sustainable buildings: experimental characterization, energy and environmental performance assessment. *Energy and Buildings*, 208, 109636. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109636>
- da Silva, M. G., Lisbôa, A. C. L., Hoffmann, R., da Cunha Kemerich, P. D., de Borba, W. F., Fernandes, G. D., & de Souza, É. E. B. (2021). Greenhouse gas emissions of rice straw-to-methanol chain in Southern Brazil. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(3), 105202. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105202>
- DDS Calorimeters. (2016). *CAL3K-AP Oxygen Bomb Calorimeter System*. <https://www.ddscalorimeters.com/cal3k-ap-calorimeter/>
- Dietrich, M. L., Sarmoria, C., Brandolin, A., & Asteasuain, M. (2018). High-Pressure Polymerization of Ethylene in Tubular Reactors: Prediction of the Bivariate Distributions of Molecular Weight-Branched with a Rigorous Reactor Model. In *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. 44, pp. 1447–1452). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64241-7.50236-6>
- Eesti Konjunkturiinstituut. (2008). *Ülevaade Eesti bioenergia turust 2007. aastal*. [https://energiatalgud.ee/sites/default/files/images\\_sala/3/3f/EKI.\\_Ylevaade\\_Eesti\\_bioenergia\\_turust\\_2007.pdf](https://energiatalgud.ee/sites/default/files/images_sala/3/3f/EKI._Ylevaade_Eesti_bioenergia_turust_2007.pdf)
- Eesti Konjunkturiinstituut. (2011). *Ülevaade Eesti bioenergia turust 2010. aastal*. [http://www.ki.ee/publikatsioonid/valmis/Ylevaade\\_Eesti\\_bioenergia\\_turust\\_2010.\\_aastal.pdf](http://www.ki.ee/publikatsioonid/valmis/Ylevaade_Eesti_bioenergia_turust_2010._aastal.pdf)
- Eesti Märgalade Ühing. (2021). *Madalsood*. <http://www.soo.ee/madalsood>
- Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus. (2016). *EVS-ISO 1928:2016 - Tahked mineraalsed kütused. Ülemise kütteväärtuse määramine kalorimeetrilise pommi meetodil ja alumise kütteväärtuse arvutamise*. <https://www.evs.ee/et/evs-iso-1928-2016>
- Eesti Turbaliit. (2018). *Turvas*. <https://www.turbaliit.ee/turvas/>
- Emblem, A. (2012). Plastics properties for packaging materials. In *Packaging Technology* (pp. 287–309). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857095701.2.287>
- European Commission. (2006). *Is Sewage Sludge a Fuel or a Waste?* [https://ec.europa.eu/environment/integration/research/newsalert/pdf/37na1\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/environment/integration/research/newsalert/pdf/37na1_en.pdf)
- European Environment Agency. (2020). *Biodegradable and compostable plastics — challenges and opportunities*. <https://www.eea.europa.eu/publications/biodegradable-and-compostable-plastics/biodegradable-and-compostable-plastics-challenges>
- Fadare, O. O., & Okoffo, E. D. (2020). Covid-19 face masks: A potential source of microplastic fibers in the environment. *Science of the Total Environment*, 737,

140279. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140279>
- Fagnäs, L., Brammer, J., Wilén, C., Lauer, M., & Verhoeff, F. (2010). Drying of biomass for second generation synfuel production. *Biomass and Bioenergy*, *34*(9), 1267–1277. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.04.005>
- Furness, D. T., Hoggett, L. A., & Judd, S. J. (2000). Thermochemical Treatment of Sewage Sludge. *Water and Environment Journal*, *14*(1), 57–65. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2000.tb00227.x>
- Gobbato, B. B. (2019). Setting Up Your Own Home 3D Printing “Plant.” In *3D Printing in Orthopaedic Surgery* (pp. 195–208). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-58118-9.00016-6>
- Hahladakis, J. N., & Iacovidou, E. (2018). Closing the loop on plastic packaging materials: What is quality and how does it affect their circularity? *Science of the Total Environment*, *630*, 1394–1400. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.330>
- Hamad, K., Kaseem, M., & Deri, F. (2013). Recycling of waste from polymer materials: An overview of the recent works. *Polymer Degradation and Stability*, *98*(12), 2801–2812. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.09.025>
- Hanania, J., Sheardown, A., Stenhouse, K., & Donev, J. (2019). Ash. <https://energyeducation.ca/encyclopedia/Ash>
- Hansen, V., Müller-Stöver, D., Imparato, V., Krogh, P. H., Jensen, L. S., Dolmer, A., & Hauggaard-Nielsen, H. (2017). The effects of straw or straw-derived gasification biochar applications on soil quality and crop productivity: A farm case study. *Journal of Environmental Management*, *186*, 88–95. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.041>
- Hao, Z., Yang, B., & Jahng, D. (2018). Combustion characteristics of biodried sewage sludge. *Waste Management*, *72*, 296–305. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.11.008>
- Harun, N. Y., & Afzal, M. T. (2016). Effect of Particle Size on Mechanical Properties of Pellets Made from Biomass Blends. *Procedia Engineering*, *148*, 93–99. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.445>
- He, K., Zhang, J., & Zeng, Y. (2018). Rural households’ willingness to accept compensation for energy utilization of crop straw in China. *Energy*, *165*, 562–571. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.023>
- Järve Biopuhastus OÜ. (2018). *Kohtla-Järve reovepuhasti settekäitluse arendamine*. [https://www.keskkonnaamet.ee/sites/default/files/tehnoloogiate\\_kirjeldus\\_1.pdf](https://www.keskkonnaamet.ee/sites/default/files/tehnoloogiate_kirjeldus_1.pdf)
- Joosten, H., & Clark, D. (2002). *Wise use of mires and peatlands. Background and principles including a framework for decision making*. International Mire Conservation Group and International Peat Society, NHBS Ltd.



- Joosten, H., & Couwenberg, J. (2008). *Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change*.  
[http://www.imcg.net/media/download\\_gallery/books/assessment\\_peatland.pdf](http://www.imcg.net/media/download_gallery/books/assessment_peatland.pdf)
- Justsen Energiteknik. (2020). *Straw to Produce Heat*.  
<https://stateofgreen.com/en/partners/justsen-energiteknik/solutions/straw-to-produce-heat/>
- Justsen Energiteknik. (2021). *Biomass for Biogas*.  
<https://justsen.dk/portfolio/biomass-for-biogas/>
- Kalina, M., & Tilley, E. (2020). "This is our next problem": Cleaning up from the COVID-19 response. In *Waste Management* (Vol. 108, pp. 202–205). Elsevier Ltd.  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.05.006>
- Kaljuste, D. (2011). *Luhaheina kui biokütuste võimalike kasutamiskohtade kaardistamine Eestis* (p. 41).
- Karayannidis, G. P., Achilias, D. S., Sideridou, I. D., & Bikiaris, D. N. (2005). Alkyd resins derived from glycolized waste poly(ethylene terephthalate). *European Polymer Journal*, 41(2), 201–210.  
<https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2004.10.001>
- Keskkonnaministeerium. (2017). *Reoveesette käitlemine-peamised probleemid ja võimalikud lahendused*.  
[https://www.envir.ee/sites/default/files/reoveesette\\_kaitlemine\\_-\\_peamised\\_probleemid\\_ja\\_voimalikud\\_lahendused\\_0.pdf](https://www.envir.ee/sites/default/files/reoveesette_kaitlemine_-_peamised_probleemid_ja_voimalikud_lahendused_0.pdf)
- Keskkonnaministeerium. (2019). *Reoveesette taaskasutus*.  
<https://www.envir.ee/et/eesmargid-tegevused/vesi/reoveesette-taaskasutus>
- Keskkonnaministeerium, Keskkonnainvesteeringutekeskus, & Aqua Consult Baltic OÜ. (2015). *Regionaalsete reoveesette käitlemise lahenduste väljatöötamine ja jäätmete lakkamise kriteeriumite väljatöötamine reoveesette kohta IV osa aruanne*.  
[https://www.envir.ee/sites/default/files/reoveesette\\_jaatmete\\_lakkamise\\_kriteeriumid\\_iv\\_osa.pdf](https://www.envir.ee/sites/default/files/reoveesette_jaatmete_lakkamise_kriteeriumid_iv_osa.pdf)
- Klemeš, J. J., Fan, Y. Van, Tan, R. R., & Jiang, P. (2020). Minimising the present and future plastic waste, energy and environmental footprints related to COVID-19. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 127, 109883.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109883>
- Kosyakov, D. S., Ul'yanovskii, N. V., Latkin, T. B., Pokryshkin, S. A., Berzhonskis, V. R., Polyakova, O. V., & Lebedev, A. T. (2020). Peat burning – An important source of pyridines in the earth atmosphere. *Environmental Pollution*, 266, 115109. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115109>
- Kriipsalu, M., Maastik, A., & Truu, J. (2016). *Jäätmekäitlus ja pinnase tervendamise*.

Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus.

- Krzan, A., Hemjinda, S., Miertus, S., Corti, A., & Chiellini, E. (2006). Standardization and certification in the area of environmentally degradable plastics. In *Polymer Degradation and Stability* (Vol. 91, Issue 12, pp. 2819–2833). Elsevier.  
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2006.04.034>
- Kukk, R. (2016). *Põhu kasutamine energia tootmiseks*. Tallinna Tehnikaülikool.
- Kukk, R. (2018). *Puidupõhise biomassi energeetiline kasutusvõimalus {Eestis} ja seda piiravad tegurid* [Tallinna Tehnikaülikool].  
<https://digikogu.taltech.ee/et/item/3a74f323-1b6a-41ac-836a-e8ae770e1ecf>
- Kuus, K. (2019, Oktoober 19). Põhk on väärt ehitusmaterjal, kui seda õigesti kasutada. *Maaleht*. <https://maaleht.delfi.ee/artikkel/87673193/pohk-on-vaart-ehitusmaterjal-kui-seda-oiigesti-kasutada>
- Li, B., Wang, F., Chi, Y., & Yan, J. H. (2014). Study on optimal energy efficiency of a sludge drying-incineration combined system. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 16(4), 684–692. <https://doi.org/10.1007/s10163-014-0293-3>
- Li, H., Chen, Q., Zhang, X., Finney, K. N., Sharifi, V. N., & Swithenbank, J. (2012). Evaluation of a biomass drying process using waste heat from process industries: A case study. *Applied Thermal Engineering*, 35, 71–80.  
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.10.009>
- Liang, Y., Xu, D., Feng, P., Hao, B., Guo, Y., & Wang, S. (2021). Municipal sewage sludge incineration and its air pollution control. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 295, p. 126456). Elsevier Ltd.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126456>
- Linn High Therm. (2021). *LM-Model*. <https://www.linn-high-therm.de/products/resistance-heating/batch/laboratory-furnaces/details/lm-model.html>
- Liuzzi, S., Rubino, C., Martellotta, F., Stefanizzi, P., Casavola, C., & Pappalettera, G. (2020). Characterization of biomass-based materials for building applications: The case of straw and olive tree waste. *Industrial Crops and Products*, 147, 112229. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112229>
- McKeen, L. W. (2019). Polyesters. In *The Effect of UV Light and Weather on Plastics and Elastomers* (pp. 125–165). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816457-0.00005-8>
- Mertes, A. (2020). *What Are the Different Types of Plastic?*  
<https://www.qualitylogoproducts.com/promo-university/different-types-of-plastic.htm>
- Mishra, R. K., Iyer, J. S., & Mohanty, K. (2019). Conversion of waste biomass and waste nitrile gloves into renewable fuel. *Waste Management*, 89, 397–407.

- <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.032>
- Modor Plastics. (2017). *Thermoset vs. Thermoplastics*.  
<https://www.modorplastics.com/plastics-learning-center/thermoset-vs-thermoplastics/>
- National Institute of Environmental Health Sciences. (2020). *Bisphenol A (BPA)*.  
<https://www.niehs.nih.gov/health/topics/agents/sya-bpa/index.cfm>
- Nei, L., & Lillenber, M. (2009, July). Reoveesetest valmistatud komposti peab kontrollima. *Keskkonnatehnika*, 12–13.  
<https://keskkonnatehnika.ee/reoveesetest-komposti-peab-kontrollima/>
- Nikolaisen, L., Nielsen, C., Larsen, M. G., Nielsen, V., Zielke, U., Kristensen, J. K., & Holm-Christensen, B. (1998). *Straw for energy production* (2nd-ed ed.). Danish Energy Agency. <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/333919>
- Oever, M. Van Den, Molenveld, K., Zee, M. Van Der, & Bos, H. (2017). *Bio-based and biodegradable plastics : facts and figures : focus on food packaging in the Netherlands*. Wageningen Food & Biobased Research.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.18174/408350>
- Oladejo, J., Shi, K., Luo, X., Yang, G., & Wu, T. (2018). A Review of Sludge-to-Energy Recovery Methods. *Energies*, 12(1), 60. <https://doi.org/10.3390/en12010060>
- Orru, M., & Orru, H. (2003). *Kahjulikum elemendid Eesti turbas*. Eesti Geoloogiakeskus.
- Panda, A. K., Singh, R. K., & Mishra, D. K. (2010). Thermolysis of waste plastics to liquid fuel. A suitable method for plastic waste management and manufacture of value added products-A world prospective. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 14, Issue 1, pp. 233–248). Pergamon.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.005>
- Parashar, N., & Hait, S. (2021). Plastics in the time of COVID-19 pandemic: Protector or polluter? In *Science of the Total Environment* (Vol. 759, p. 144274). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144274>
- Patrício Silva, A. L., Prata, J. C., Walker, T. R., Duarte, A. C., Ouyang, W., Barcelò, D., & Rocha-Santos, T. (2021). Increased plastic pollution due to COVID-19 pandemic: Challenges and recommendations. In *Chemical Engineering Journal* (Vol. 405, p. 126683). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126683>
- Phonphuak, N., & Chindaprasirt, P. (2015). Types of waste, properties, and durability of pore-forming waste-based fired masonry bricks. In *Eco-efficient Masonry Bricks and Blocks: Design, Properties and Durability* (pp. 103–127). Elsevier Inc.  
<https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-305-8.00006-1>
- PlasticsEurope. (2013). *Plastics - The Facts 2013 by PlasticsEurope*.  
<http://www.plasticseurope.org/documents/document/20111107101127->

- final\_pe\_factsfigures\_uk2011\_lr\_041111.pdf
- Plastics Europe. (2015). *PlasticsEurope Plastics - the Facts 2015*.  
[https://www.plasticseurope.org/application/files/3715/1689/8308/2015plastics\\_the\\_facts\\_14122015.pdf](https://www.plasticseurope.org/application/files/3715/1689/8308/2015plastics_the_facts_14122015.pdf)
- Plastics Europe. (2017). *Biodegradable plastics*.  
<https://www.plasticseurope.org/en/about-plastics/what-are-plastics/large-family/biodegradable-plastics>
- Plastic Europe. (2019). *Plastics Europe. Plastics - The Facts 2019*.  
[https://www.plasticseurope.org/pl/resources/publications/1804-plastics-facts-2019%0Ahttps://www.plasticseurope.org/application/files/9715/7129/9584/FINAL\\_web\\_version\\_Plastics\\_the\\_facts2019\\_14102019.pdf](https://www.plasticseurope.org/pl/resources/publications/1804-plastics-facts-2019%0Ahttps://www.plasticseurope.org/application/files/9715/7129/9584/FINAL_web_version_Plastics_the_facts2019_14102019.pdf)
- Raddadi, N., & Fava, F. (2019). Biodegradation of oil-based plastics in the environment: Existing knowledge and needs of research and innovation. *Science of The Total Environment*, 679, 148–158.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.419>
- Rethink Waste. (2019). *Rethink Waste*. <https://rethinkwaste.org/wp-content/uploads/2019/10/The-Hard-Facts-About-Plastic.pdf>
- Rytting, M. (2017). *Kinds of Plastic in Gatorade Bottles*. <https://sciencing.com/kinds-plastic-gatorade-bottles-8206011.html>
- Saberian, M., Li, J., Kilmartin-Lynch, S., & Boroujeni, M. (2021). Repurposing of COVID-19 single-use face masks for pavements base/subbase. *Science of the Total Environment*, 769, 145527.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145527>
- Sangeetha Devi, R., Ramya, R., Kannan, K., Robert Antony, A., & Rajesh Kannan, V. (2019). Investigation of biodegradation potentials of high density polyethylene degrading marine bacteria isolated from the coastal regions of Tamil Nadu, India. *Marine Pollution Bulletin*, 138, 549–560.  
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.12.001>
- Sangkham, S. (2020). Face mask and medical waste disposal during the novel COVID-19 pandemic in Asia. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2, 100052. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2020.100052>
- Sastri, V. R. (2010). Materials Used in Medical Devices. In *Plastics in Medical Devices* (pp. 21–32). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-8155-2027-6.10003-0>
- Sastri, V. R. (2014). Materials Used in Medical Devices. In *Plastics in Medical Devices* (pp. 19–31). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-1-4557-3201-2.00003-3>
- Sauga, A. (2020). *Statistika õpik majanduseriala üliõpilastele*. TalTech Kirjastus.  
<https://digikogu.taltech.ee/et/Item/bdcc647f-fa18-47c1-b499-99024f8bcc93>
- Schwarz, A. E., Lighthart, T. N., Godoi Bizarro, D., De Wild, P., Vreugdenhil, B., & van

- Harmelen, T. (2021). Plastic recycling in a circular economy; determining environmental performance through an LCA matrix model approach. *Waste Management, 121*, 331–342. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.12.020>
- Seaman, G. (2012). *Plastics by the Numbers*. Eartheasy. <https://learn.eartheasy.com/articles/plastics-by-the-numbers/>
- Selke, S. E., & Hernandez, R. J. (2001). Packaging: Polymers in Flexible Packaging. In *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* (pp. 6652–6656). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b0-08-043152-6/01176-1>
- Selvaranjan, K., Navaratnam, S., Rajeev, P., & Ravintherakumaran, N. (2021). Environmental challenges induced by extensive use of face masks during COVID-19: A review and potential solutions. *Environmental Challenges, 3*, 100039. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100039>
- Shadbahr, J., Zhang, Y., Khan, F., & Hawboldt, K. (2018). Multi-objective optimization of simultaneous saccharification and fermentation for cellulosic ethanol production. *Renewable Energy, 125*, 100–107. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.106>
- Shamsi, R., Asghari, G. H., Mir Mohamad Sadeghi, G., & Nazarpour-Fard, H. (2018). The effect of multiwalled carbon nanotube and crosslinking degree on creep-recovery behavior of PET waste originated-polyurethanes and their nanocomposites. *Polymer Composites, 39*(S2), E1013–E1024. <https://doi.org/10.1002/pc.24420>
- Shyamalee, D., Amarasinghe, A. D. U. S., & Senanayaka, N. S. (2015). Evaluation of different binding materials in forming biomass briquettes with saw dust. *International Journal of Scientific and Research Publications, 5*(3), 1–8. [https://www.researchgate.net/publication/284534867\\_Evaluation\\_of\\_different\\_binding\\_materials\\_in\\_forming\\_biomass\\_briquettes\\_with\\_saw\\_dust](https://www.researchgate.net/publication/284534867_Evaluation_of_different_binding_materials_in_forming_biomass_briquettes_with_saw_dust)
- Singh, V., Phuleria, H. C., & Chandel, M. K. (2020). Estimation of energy recovery potential of sewage sludge in India: Waste to watt approach. *Journal of Cleaner Production, 276*, 122538. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122538>
- SpecialChem. (2017). *The Definitive Guide to Polypropylene (PP)*. <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polypropylene-pp-plastic>
- SpecialChem. (2020a). *Polyethylene (PE)*. <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyethylene-plastic>
- SpecialChem. (2020b). *Polyethylene Terephthalate (PET): A Comprehensive Review*. <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyethylene-terephthalate-pet-plastic>
- Speight, J. G. (2020). Types and properties of fuels from nonfossil fuel sources. In *The Refinery of the Future* (pp. 469–513). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0->

12-816994-0.00013-0

- Spontex UK Ltd. (2019). *Recycle disposable gloves!*  
<https://www.spontex.co.uk/blogs/recycle-disposable-gloves/>
- Srinivasa Rao, L., Naidu, C. D., & Tiwari, S. (2021). Investigation on synthesis, structure and degradability of starch based bioplastics. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.917>
- Srinuanpan, S., Cheirsilp, B., & Prasertsan, P. (2018). Effective biogas upgrading and production of biodiesel feedstocks by strategic cultivation of oleaginous microalgae. *Energy*, 148, 766–774.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.010>
- Staples, Y. (2018). *Nitrile Gloves Frequently Asked Questions and Answers (FAQ)*.  
<https://www.theglovecompany.com.au/hands-on-safety-blog/2018/nitrile-gloves-frequently-asked-questions-and-answers-faqs/>
- Statistikaamet. (2021a). *Jäätmed ja ringmajandus*. <https://www.stat.ee/et/avasta-statistikat/valdkonnad/keskkond/jaatmed-ja-ringmajandus>
- Statistikaamet. (2021b). *PM56: PÕLLUMAJANDUSTOODANG (1995-2016)*.  
[https://andmed.stat.ee/et/stat/Lepetatud\\_tabelid\\_\\_Majandus.Arhiiv\\_\\_Pellumajandus.Arhiiv/PM56/table/tableViewLayout1](https://andmed.stat.ee/et/stat/Lepetatud_tabelid__Majandus.Arhiiv__Pellumajandus.Arhiiv/PM56/table/tableViewLayout1)
- Stehouwer, R. (2010). *What is sewage sludge and what can be done with it?*  
<https://extension.psu.edu/what-is-sewage-sludge-and-what-can-be-done-with-it>
- Suh, D. ., Park, O. ., & Yoon, K. . (2000). The properties of unsaturated polyester based on the glycolyzed poly(ethylene terephthalate) with various glycol compositions. *Polymer*, 41(2), 461–466. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(99\)00168-8](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(99)00168-8)
- Syed-Hassan, S. S. A., Wang, Y., Hu, S., Su, S., & Xiang, J. (2017). Thermochemical processing of sewage sludge to energy and fuel: Fundamentals, challenges and considerations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80(January), 888–913. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.262>
- Szymajda, A., & Łaska, G. (2019). *The Effect of Moisture and Ash on the Calorific Value of Cow Dung Biomass*. 16(1), 4.  
<https://doi.org/10.3390/proceedings2019016004>
- Tartu Regiooni Energiaagentuur. (2013). *BIOMASSI KASUTAMINE ENERGEETIKAS LÕUNA-EESTI REGIOONIS*.  
[https://energiatalgud.ee/sites/default/files/images\\_sala/0/0b/Lõuna-Eesti\\_BioMAK.pdf](https://energiatalgud.ee/sites/default/files/images_sala/0/0b/Lõuna-Eesti_BioMAK.pdf)
- Tõlp, S. (2010). *Põllumajandusloomade söötmisel kasutatavad söödad ja nende toiteväärtus*. [http://ph.emu.ee/~irjel/Sootmine/sootade\\_moodul/phk.html](http://ph.emu.ee/~irjel/Sootmine/sootade_moodul/phk.html)
- Tsiamis, D. A., & Castaldi, M. J. (2016). *DETERMINING ACCURATE HEATING*

- VALUES OF NON-RECYCLED PLASTICS (NRP).  
<https://plastics.americanchemistry.com/Energy-Values-Non-Recycled-Plastics.pdf>
- Unal, N. I., Mertdinc, S., Haykiri-Acma, H., & Yaman, S. (2017). Comparison of the fuel properties and the combustion behavior of PET bottle caps with lignite. *Energy Procedia*, 136, 22–26. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.256>
- Vainola, A. (2015). *Põlevkivi kaevandamise arenguväljavaated*.  
[https://www.energia.ee/-/doc/10187/pdf/concern/loengusari\\_tty\\_andres\\_vainola.pdf](https://www.energia.ee/-/doc/10187/pdf/concern/loengusari_tty_andres_vainola.pdf)
- van Kooten, G. C. (2017). FELLOWS ADDRESS California Dreaming: The Economics of Renewable Energy. *Canadian Journal of Agricultural Economics/Revue Canadienne d'agroéconomie*, 65(1), 19–41. <https://doi.org/10.1111/cjag.12132>
- Vanapalli, K. R., Sharma, H. B., Ranjan, V. P., Samal, B., Bhattacharya, J., Dubey, B. K., & Goel, S. (2021). Challenges and strategies for effective plastic waste management during and post COVID-19 pandemic. *Science of the Total Environment*, 750, 141514. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141514>
- Vares, V., Kask, Ü., Muiste, P., Pihu, T., & Soosaar, S. (2005). *Biokütuse kasutaja käsiraamat*. Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus.
- Velling, S., & Vaasma, T. (2012). *Energiaallikas põlevkivi*.  
<https://dspace.ut.ee/bitstream/handle/10062/27643/kttevirtus.html>
- Virkus, K. (2014). *Kivisöe ja põlevkivi koospõletamise tuha analüüs* [Tallinna Tehnikaülikool]. <https://digikogu.taltech.ee/en/Item/8e72e7e4-bab4-4d8c-b5fc-d13086d16449>
- Voytenko, Y., & Peck, P. (2012). Organisational frameworks for straw-based energy systems in Sweden and Denmark. *Biomass and Bioenergy*, 38, 34–48.  
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.049>
- Wasilewski, R. (2013). Energy recovery from waste plastics. *Chemik 2013*, 67(5), 435–445.
- World Health Organization. (2020). *Shortage of personal protective equipment endangering health workers worldwide*. <https://www.who.int/news/item/03-03-2020-shortage-of-personal-protective-equipment-endangering-health-workers-worldwide>
- World Nuclear Association. (2021). *Heat Values of Various Fuels*. <https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/heat-values-of-various-fuels.aspx>
- Wu, W. I., Rezai, P., Hsu, H. H., & Selvaganapathy, P. R. (2013). Materials and methods for the microfabrication of microfluidic biomedical devices. In *Microfluidic Devices for Biomedical Applications* (pp. 3–62). Elsevier Inc.  
<https://doi.org/10.1533/9780857097040.1.3>

Yilmaz, E., Wzorek, M., & Akçay, S. (2018). Co-pelletization of sewage sludge and agricultural wastes. *Journal of Environmental Management*, 216, 169–175.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.012>