



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO  
INSENERITEADUSKOND  
Instituudi nimetus

**PÕLEVKIVITUHA JA HEITVEEMUDA  
KOOSUTILISEERIMINE**

**CO-UTILISATION OF OIL SHALE ASH AND WASTE WATER SLUDGE**

KEEMIASTEHNOLÓGIA ÖPPEKAVA LÕPUTÖÖ

Üliõpilane: Anton Stanislavov  
Üliõpilaskood: 178537EDKR  
Juhendaja: Antonina Zguro, lektor

Kohtla-Järve, 2023

# 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.

"30". mai 2023

Autor: Anton Stanislavov

/ allkiri /

Töö vastab rakenduskõrgharidusõppe lõputööle esitatud nõuetele

"31". mai 2023

Juhendaja: Antonina Zguro

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"31". mai 2023

Kaitsmiskomisjoni esimees Antonina Zguro

/ nimi ja allkiri /

# **LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ REPRODUTSEERIMISEKS JA LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS**

Mina, Anton Stanislavov (sünnikuupäev: 17.02.1986)

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

„Põlevkivituha ja heitveemuda koosutiliseerimine“, mille juhendaja on Antonina Zguro,

1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja elektroonilise avaldamise eesmärgil, sealhulgas 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.

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

2. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta kolmandate isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ja teistest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

31.05.2023

# TalTech Inseneriteaduskond Virumaa kolledž

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Anton Stanislavov, 178537EDKR

Õppekava, peeriala: EDKR16/17 Keemiatehnoloogia

**Juhendaja: lektor, Antonina Zguro, antonina.zguro@taltech.ee**

### Lõputöö teema:

(eesti keeles) Põlevkivituha ja heitveemuda koosutiliseerimine

(inglise keeles) Co-utilization of oil shale ash and wastewater sludge

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Pakkuda välja viis põlevkivituha ja reoveesete koosutiliseerimiseks
2. Kirjandusallikate alusel viia läbi põlevkivituha ja reoveesetete keemilise koostise ja füüsikaliste omaduste ning kasutusvalade analüüs
3. Pakkuda põlevkivituha ja reoveesete koosutiliseerimise tehnilise lahenduse

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Põlevkivituha ja reoveesetete keemilise koostise ja füüsikaliste omaduste analüüs	03.03.23
2.	Põlevkivituha ja reoveesetete kasutusvalade analüüs	20.03.23
3.	Põlevkivituha ja reoveesete koosutiliseerimise tehnilise lahenduse	25.04.23
4.	Lõputöö lõplik vormistamine	15.05.23

**Töö keel:** eesti

**Lõputöö esitamise tähtaeg:** "22."05. 2023.a

**Üliõpilane:** Anton Stanislavov

"15."02. 2023.a

/allkiri/

**Juhendaja:** Antonina Zguro

"16."02. 2023.a

/allkiri/

**Programmijuht:** Antonina Zguro

"16."02. 2023.a

/allkiri/

# SISUKORD

AUTORIDEKLARATSIOON.....	2
LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ REPRODUTSEERIMISEKS JA LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS .....	3
EESSÕNA .....	7
Lühendite ja tähiste loetelu.....	8
SISSEJUHATUS .....	9
1.    PÕLEVKIVITUHA JA REOVETE SETTEJÄÄGI ISELOOMUSTUS .....	10
1.1.    Põlevkivituhk.....	10
1.1.1    Põlevkivituha kasutus .....	12
1.2.    Reoveesete .....	15
1.3.    Kääritatud reoveesete ja põlevkivituha ümbertöötlemine .....	23
2.    ARVUTUSLIK OSA .....	26
2.1.    Trummelkuivati arvutus.....	26
2.2.    Segisti arvutus .....	34
2.3.    Granulaatori arvutus .....	42
KOKKUVÕTE .....	47
SUMMARY .....	48
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	50
Lisa 1. OÜ Järve Biopuhastus stabiliseeritud reoveesete analüüsitulemused 2022 ....	53
Lisa 2. Põlevkivi proovivõtu kohtade skeem .....	54
Lisa 3. $A_B$ ja $\psi$ koefitsientide väärtused .....	55

## **EESSÕNA**

Käesoleva lõputöö teema valis töö autor koostöös õppejõu Antonina Zguro ja Põlevkivi Kompetentsikeskuse teaduriga PhD Larissa Grigorjevaga. Autor tahaks avaldada sügavat tänu õppejuhile Antonina Zguro´le ja Larissa Grigorjeva´le abi eest aktuaalse teema valikul, lõputöö koostamisel ja kirjutamisel.

Teema on valitud põlevkivitööstuse jäätmete ladustamise ja säilitamise aktuaalsest probleemist lähtudes, arvestades asjaolu, et puudub reoveesette täieliku kasutamise võimalus. Antud probleem vajab lahendamist.

Käesoleva töö eripäraks on võimalike tehniliste lahenduste otsing.

## **Lühendite ja tähiste loetelu**

PC - pulverized combustion

CFBC - circulatingfluidized-bedcombustion

TSK - tahke soojuskandja

SHC - Solid Heat Carrier

AS - aktsiaselts

OÜ - osaühing

EÜ – Euroopa Ühiskond

PAH - polütsüklilised aromaatsed süsivesinikud

PCB - polükloreeritud bifenüülid

KIK - Keskkonnainvesteeringute Keskus

lad. – ladina keel

## SISSEJUHATUS

Kaasaegses maailmas moodustub üliras koguses jäätmeid, millede utiliseerimise ja ladustamise keerukus loob ökoloogilise iseloomuga probleeme. Iga riigi eesmärgiks on nii olme- kui tööstusjäätmete vähendamine. Üha sagedamini suunavad riigid oma tähelepanu tsirkulaarmajanduse meetoditele. Taolise lähenemise eesmärk - vähendada esmaste materiaalse ja energeetilise ressurside tarbimist ja suurendada tootmisjäätmete kasutamist ja tarbimist. Loodusressursid, mida kasutatakse erinevat liiki tootmise ja tarbimise vajadusteks, ei ole piiratud. Retsirkulatsiooniliste põhimõtete rakendamine lubab täisulikumalt kasutada kõiki toormes sisalduvaid kasulikke komponente, andes nendele täiendava väärtuse, alandada jäätmete mahtu ja vähendada nende ladustamise ja utiliseerimise kulusid.

Eestis moodustub igal aastal üle kuue miljoni tonni põlevkivituhka, millest enam kui 96% suunatakse tuha säilituspolügoonidele (tuhapuistangutele) [1]. Põlevkivituhal on suur potentsiaal toormena kasutamiseks erinevates majandusvaldkondades. Põhilisteks kasutusvaldkondadeks on: ehitusmaterjalide tootmine, teede-ehitus, samuti põllu- ja metsamajandus.

Eestis moodustub igal aastal umbes 150000 m<sup>3</sup> niisket reoveesetet [2].

Nendest 72% on kordvkasutatavad põllumajanduses väetisena ja laostatud maade taastamiseks, 12,4% kasutatakse haljastuseks, 8,3% aga suunatakse prügilatesse ning 7% polügoonidele, sette väiksemat osa kasutatakse energia rekuperatsiooniks selle põletamise teel [3].

Teadaolevalt võib reoveesetet ja tuhka üheskoos kasutada pinnase omaduste parendamiseks. Taoliseid uuringuid korraldati erineval ajal ja erinevates riikides, muuhulgas 2021. aastal ka Eestis.

Lõputöö eesmärgiks on pakkuda tehniline lahendus põlevkivitolmu ja reoveesette segust granuleeritud pinnase parendaja tootmiseks.

Käesoleva töö esimeses osas on ära toodud erinevates tootmistes kasutatava põlevkivituha ja reoveesette omadused ja koostis, nende põhilised kasutusvaldkonnad. Vaadatud läbi reoveesette ja põlevkivituha ühine ümbertöötlus labori tingimustes pinnase granuleeritud parendaja saamiseks.

Töö teises osas on välja pakutud granuleeritud toote tootmise skeem ning arvutatud välja tehnoloogilise seadmestiku: trummelkuivati, tigusegisti ja trummelgranulaator-kuivati parameetrid.



# 1. PÕLEVKIVITUHA JA REOVETE SETTEJÄÄGI ISELOOMUSTUS

## 1.1. Põlevkivituhk

Põlevkivituhk ehk põletatud põlevkivi on põlevkivi põletamisel moodustuv mineraalmaterjal. Eesti põlevkivi - kukersiit - on kõrge mineraalsisaldusega toode, mis koosneb peamiselt karbonaatidest (62-66%), savimineraalidest ja kvartsist; vähemas koguses sisaldab püriiti ja muid mineraale.

Ühe tonni põlevkivi põletamisel moodustub 0,43–0,44 tonni põlevkivituhka. Põlevkivi elektrijaamade töö tulemusel moodustub igal aastal enam kui 6 miljonit tonni põlevkivituhka, millest enam kui 96% suunatakse tuha säilituspolügonidele (tuhapuistangutele) [1].

Põlevkivituhk on peeneteraline kerge pulber. Tuha koostis sõltub suuresti põletamistehnoloogiast ja temperatuurist, samuti selle valimiskohast. Elektrijaamades kasutatakse kahte põlevkivi põletamise tehnoloogiat: tolmpõletamist (pulverized combustion – PC) ja põletamist tsirkuleerivas keevas kihis (circulatingfluidized-bedcombustion – CFBC). Kateldes põletavat tuhka nimetatakse koldetuhaks, gaasidega eemaldavat tuhka aga lendtuhaks. Lendtuhka püütakse erinevates katlaagregaadi sõlmedes: ülekuumendis, ökonomaiseris, õhuelsoojendis, tsüklonis ja elektrifiltris või kottfiltris (vt. Lisa 2 Põlevkivi proovivõtu kohtade skeem Eesti Elektrijaama katlal CFBC)

Tolmpõletamise (PC) tehnoloogia kasutamisel moodustab põlemistemperatuur 1250–1450 °C. Keevkihi kateldes (CFBC) põletatakse suurte osakestega põlevkivi (kuni 10 mm) temperatuuril 750–850 °C. Nende temperatuuride juures toimub orgaaniliste ainete põlemine, samuti mitteorgaaniliste ainete lagunemine ja muud moondumised. Karbonaatide (kaltsiidi ja dolomiidi) lagunemisel moodustuvad kaltsiumoksiid CaO ja magneesiumoksiid MgO. 60–70% kaltsiumoksiidi, mis moodustub tolmpõletamise teel, sisaldub tuhas seotuna (erinevate mineraalidena), umbes 25–35% kaltsiumoksiidi CaO ei ole keemiliselt seotud (vaba CaO, kustutamata lubi). Reaktsioonides kaltsiumoksiidiga osaleb kvartsi SiO<sub>2</sub>, mistõttu esinevad tuhas kaltsiumsilikaadid. Väavli tõttu, mis sisaldub põlevkivi orgaanilises ja mineraalosas, esinevad tuhas sulfaatühendid.

Tolmpõletamise kateldes toimub kõrgemate temperatuuride arvel praktiliselt täielik karbonaatide lagunemine. Keevkihi kateldes moodustab karbonaatide lagunemise tase 60–75%. CFBC tehnoloogiapõhiselt seob tuhk efektiivselt põlemisprotsessis moodustuvat vääveldioksiidi SO<sub>2</sub>, mistõttu sisaldub CFBC tuhas hulgaliselt sulfaate. Põhiliste silikaatfaasidena sisaldab CFBC tuhk kvartsi SiO<sub>2</sub>; päevakivi KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>; PC tuhk

sisaldab rohkem sekundaarseid silikaate, selliseid nagu beliiti  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  ja merviniiti  $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$ .

Samuti on erinevus tuhaosakeste suuruses. CFBC tuhas varieerub osakeste suurus 0,045 kuni 10 mm, kusjuures pea poole osakeste suurus on enam kui 0,63 mm. PC tuhk on osakeste suuruse poolest homogeensem. CFBC tuha osakestel on korrapäratu vorm, poorne ja ebaühtlane pind. PC tuha osakestel on sfääriline vorm ja ühtlane pind.

Põlevkivituhk tekib samuti põlevkivi ümbertöötlemisel Galoter tehnoloogia põhjal. Selle tehnoloogia baasil loodud seadmete tähiseks on TSK – tahke soojuskandja (ingl. SHC - Solid Heat Carrier). Tehnoloogia olemus seisneb põlevkivi orgaanilise osa (kerogeeni) kiires termilises lagunemises (pürolüüs) selle soojendamisel reaktoris hapniku juurdepääsuta kuni 450 °C tahke soojuskandjaga - põlevkivituhaga - segamise ajal. Kerogeeni lagunemisel eraldub aurugaasisegu, mis jahutamisel ja kondenseerimisel jaguneb poolkoksgaasiks ja erinevateks põlevkivivaigu fraktsioonideks. Käesoleval ajal töötavad selle tehnoloogia põhjal Petroter seadmed (Viru Keemia Grupp AS), Enefit-140 ja Enefit-280 (Eesti Energia AS) ning TSK-500 (Kiviõli Keemiatööstus). Nendel seadmetel saadud tuhka nimetatakse vahest ka mustaks tuhaks. Tuhal on homogeenne keemiline koostis. Elementide keskmine sisaldus (%) tuhas on järgmine: Ca – 20–25, Si – 10–15, Mg – 2–5, Al – 3–6, Fe – 2–4. Väävlisisaldus on suhteliselt madal – 2–3%; orgaanilise süsiniku sisaldus 1–2,5%. Tuha peamisteks ühenditeks on kaltsiit, dolomiit, kvarts ja päevakivi. Tähtsamateks sekundaarseteks faasideks on periklaas (magneesiumoksiid) umbes 9 %-lise sisaldusega ja kaltsiumi sekundaarsed silikaadid sisaldusega 8-12%. Vaba lubja sisaldus on väike ja moodustab 3–3,5%. Spetsiifilise mineraalfaasina esineb Petroter, Enefit-140 ja TSK tuhas oldhamiit sisaldusega umbes 4%. Oldhamiit kujutab endast CaS faasi, mis on eriti iseloomulik TSK tuhale ning elektrijaamade tuhas seda ei esine. Moodustub hapniku puudumisel CaO ja SO<sub>2</sub> vahelise reaktsiooni tulemusel. Mikroelementide sisaldus TSK tuhas on umbes samasugune nagu elektrijaamade tuhas [3]. Põlevkivituha keskmine koostis on toodud tabelis 1.1.

Tabel 1.1 Tuhkade koostised [4]

<b>Keemiline analüüs</b>				
Ühend	Tuhk	KK	TP	TSK
CaO <sub>vaba</sub>		12.31	22.37	1.89
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		7.90	5.24	1.82
S <sup>2-</sup>		0.64	0.06	1.22
C <sub>üld</sub>		3.03	0.30	7.82
C <sub>anorg.</sub>		3.03	0.30	6.45
C <sub>org.</sub>		0	0	1.37
<b>Mineraloogiline koostis</b>				
SiO <sub>2</sub>	Kvarts	11.40	4.40	14.10
KaSiO <sub>4</sub>	K-päevakivi	10.20	3.90	12.70
CaCO <sub>3</sub>	Kaltsiit	27.70	3.30	29.40
CaO	Lubi	9.30	28.30	3.00
Ca(OH) <sub>2</sub>	Portlandiit	1.10	0	-
CaSO <sub>4</sub>	Anhüdriit	10.10	8.60	0.70
MgO	Periklaas	2.70	5.10	8.70
CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Dolomiit	1.40	0	10.00
CaSiO <sub>3</sub>	Vollastoniit	1.20	3.70	1.90
Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	Beliit	6.70	24.00	-
Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub>	Aliit	1.40	0	-
Ca <sub>3</sub> Mg(SiO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	Merviniit	0.80	6.30	1.30
(CaMg) <sub>2</sub> (MgAl)(SiAl) <sub>3</sub> O <sub>7</sub>	Meliliit	2.50	8.20	1.20
4CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Brownmilleriit	1.30	2.40	2.20
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Hematiit/Magnetiit	2.20	1.30	1.60
Ca <sub>11</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>4</sub> O <sub>2</sub> S	Jasmundiit	1.70	0	-
2CaO·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C2F	1.30	0	-
Ca <sub>4</sub> Al <sub>6</sub> (SO <sub>4</sub> )O <sub>12</sub>	Yeeliit	0.60	0	-
NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	Albiit	-	-	1.60
Ca <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	Rankiniit	-	-	0.90
Na,K <sub>x</sub> (Al,Mg) <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O	Iliit	6.40	0	3.40
Eripind, m <sup>2</sup> /g		6.30	0.40	7.44

2018. aastal arvati põlevkivituhk ohtlike jäätmete nimekirjast välja. [3] See lubab põlevkivituha palju rohkem kasutada erinevates valdkondades, samuti otsida täiendavaid võimalusi selle kasutamiseks väljaspool Eestit. Vastavalt REACH määrusele on põletatud põlevkivi kemikaal. Põletatud põlevkivi on kantud Euroopa keemiaagentuuri andmebaasi. Registreerimine lubab toote transportimist Euroliidu piires (REACH registreerimisnumber: 01-2119703178-42-0002).

### 1.1.1 Põlevkivituha kasutus

Põlevkivituhal on suur potentsiaal toormena kasutamiseks erinevates majandusvaldkondades. Põlevkivituha utiliseerimistehnoloogia lubab alandada koormust Ida-Virumaa keskkonnale, loodusressursside vajadust ning soodustab üleminekut suletud tsükli majandusele.

Allpool vaadeldakse põlevkivituha kasutamise peamiseid valdkondi.

## **Ehitusmaterjalide tootmine**

Põlevkivituha kasutamine ehitustööstuses on tingitud eelkõige sellest, et põlevkivituha põhikomponendiks on selle sulanud osa - šlakk-klaas. Aluminaat šlakk-klaasi, vaba lubja ja anhütriidi vahelduvkoguse kombinatsioon lubavad vaadelda põlevkivituha loomuliku sulfaat-šlakk sideainena.

Tugevleeliseline tolmu põletusega PC põlevkivituhk sisaldab lisaks vabale lubjale ja kaltsiumsulfaadile sideainete latentsete omadustega klaasitaolist faasi, putsolaani omadustega ränidioksiidi ja muid komponente. Mistõttu võib seda kasutada ehitusmaterjalide tootmise toormena [5].

Esimesed katsed kasutada põlevkivituha saavad alguse 1920-datest aastatest, mil Kohila elektrijaama tuhka kasutati episoodiliselt siduvainena ehitusmörtides. Aastatel 1920–1941 kasutati Balti manufaktuuri katlamaja tuhka autoklaavtelli tootmiseks.

Põlevkivituhk on tähtis komponent portlandtsemendi tootmisel. Põlevkivituha sisaldus moodustab selles umbes 30%. Põlevkivituha lisanditega portlandtsemendi esimene katsepartii toodeti 1960.aastal Kunda tsemenditehases (täna Kunda Nordic Tsement). Seda kiiresti kõvastuvat, külmakindlat, plastifitseeritud sulfaadikindlat ja piiratud mahuvajumisega tsementi kasutatakse betoontööstuses. Sellest betoonist ehitati Tallinna teletorn, Iru elektrijaama korsten, Sosnovõi Boris (Leningradi oblast, Venemaa) asuva elektrijaama hoone.

Ühe tonni tsemendi tootmisel moodustub 0,7 tonni CO<sub>2</sub>. Põlevkivituha kasutamine tsemendi tootmisel võib soodustada CO<sub>2</sub> heidete alandamist aastas umbes 4,2 mln tonni võrra [1].

Põlevkivituhk on kuivehitussegude (krohv, hüdroisolatsioonmaterjalid, tasandussegud jne) üks komponentidest.

Alates 1961. aastast hakati lendtuha (tsükloontuhk) jäme fraktsiooni tänu kõrgele vaba lubja sisaldusele kasutama Ahtme ehitusmaterjalide kombinaadis kärgbetoonist toodete (ehitusplokid, soojusisolatsioonplaadid, seinapaneelid jne.) tootmisel. Hiljem hakati põletatud põlevkivist kärgbetooni tootma juba uue nimetusega - Roclite (Bauroc).

## **Teedeehitus**

Põlevkivituhk sobib pehmete pinnaste üldiseks stabiliseerimiseks ning automagistraalide, raudteede vundamentide ja torustike ehitamiseks.

1970 aastast kuni 1990 aastani kasutati igal aastal 100 000 - 120 000 tonni lenduvat põlevkivituha teekatte alusena ja teekatte stabiliseerimiseks [5].

Aastatel 2010–2016 korraldati OCAMAT projekti raames põlevkivituha testimist teede ehitusmaterjalina reaalsetes oludes eksperimentaalaladel kaasaegsete teede

ehitusmeetoditega. Narva elektrijaamade põlevkivituhka testiti kahe pilootala ehituses, mis olid ehitatud kahe erineva tehnoloogia põhjal. Narva-Mustajõe lõigul pikkusega 1,6 km kasutati põlevkivituhka teekatte ülemise kihi stabiliseerimiseks. Simuna-Vaiatu lõigul pikkusega 0,9 km kasutati põlevkivituhka turbakihi süvastabiliseerimiseks. Pilootprojekti tulemused kinnitasid, et põlevkivituhka võib kasutada teede ehituses.

Tulevikuplaanides on põlevkivituha kasutamine Tallinn-Tartu maantee ja Rail Baltica raudtee ehituses.

### **Põllu - ja metsamajanduses**

Põlevkivituhal on leeliseline reaktsioon ning sisaldab lahustuvates ühendites terve rida taimede omistamiseks vajalikke keemilisi elemente (kaalium, kaltsium, fosfor, mikroelemendid). See tingib tuha kasutuse põllu- ja metsamajanduses.

Umbes möödunud sajandi teisest poolest kuni 1990 aastani kasutati lenduvat põlevkivituhka Lõuna-Eesti happeliste pinnaste lubjastamiseks [5].

Põllumajanduses kasutatakse seda peamiselt happeliste pinnaste neutraliseerimiseks. Põlevkivituhk peale elektrifiltreid on võrreldes tsüklontuhaga palju efektiivsem. Kuid seejuures tuleb silmas pidada, et happeliste pinnaste neutraliseerimiseks vajatakse seda rohkem.

Põlevkivituha eeliseks on selle kuivus, peenteralisus, hea lahustuvus ja kõrge toiteainete sisaldus. Tänu meliorandi kiirele toimele ja selle madalale kulule hektari kohta, lubab selle kasutamine põllumajanduses säästa pinnase väetamisele tehtavaid kulusid. Transportimise lihtsustamiseks ja pinnasesse kandmiseks võib kasutada tuha granuleerimist, see aga alandab oluliselt selle efektiivsust, kuna taoline tolm tsementeerub pinnases. Happeliste pinnaste paremaks lubjastamiseks on seda otstarbekam kasutada pulbri vormis.

Ettevõtte Eesti Energia toodab põlevkivituhast pinnase parendajat Enefix. Tootja väidatel „Tõstab mullaparendaja mulla viljakust ja vähendab taimehaigustesse nakatumist. Lisaks pärsib Enefix sambla kasvu pinnasel“ [6].

Viimasel ajal on põlevkivitolmu hakatud kasutama okaspuude kasvatamisel ja istutamisel. 2013 aastast korraldati Ida-Virumaal uuringuid põlevkivituha ja segatud puit-põlevkivituha toimest tavamänni kasvule. Parimad tulemused saadi segatuhaga aladel. Aladel, kus kasutati vaid põlevkivituhka, olid näitajad halvemad, kui segatuhaga kasutamisel, kuid paremad, kui väetiseta aladel. Tuha lisamine pinnasesse soodustab puude paremat kasvu, okaste pikkuse kasvu jm.

Põlevkivituhka võib samuti kasutada turbrabade taastamiseks metsastamise meetodil. Rabade metsastamine aitab siduda CO<sub>2</sub>. Sellega utiliseerub mitte ainult põlevkivituhk, vaid toimub ka biomassi kasv [7].

### **Muud kasutusvaldkonnad**

TalTech ja Tartu Ülikooli teadlased koostöös Ragn-Sells AS tiimiga arendavad põlevkivituhas sisalduvate elementide eraldamise ja nende korduvkasutuse tootmistehnoloogiat Rootsis realiseeritud analoogiliste suletud tsükli majandusprojektide näitel.

Põlevkivituhast toodetavast materjalist omandab suurima osakaalu sünteetiline kaltsiumkarbonaat. Parimad näited loodusliku kaltsiumkarbonaadi kasutamisest leiame toidu- ja farmaatsiasektorist. Kuna antud materjal pärineb töötlevast tööstusest, siis kõige tõenäolisemalt saab Ida-Virumaa põlevkivituhast toodetud kaltsiumkarbonaati hakata kasutama täiteainena värvi-, plasti- ja paberitööstuses [8].

Üheks põlevkivi ümbertöötlemise jäätmete - põlevkivituha - probleemi lahendamiseks võiks olla selle kasutamine reo- ja tehnoloogiliste vete puhastamisel orgaanilistest reostajatest (nafta ja naftatooted) ja raskemetallidest. Lisaks võib seda kasutada elektrienergia tootmisel tekkivate CO<sub>2</sub> ja väevliühendite sidumiseks.

Oma huvi tuha vastu ilmutavad suured Skandinaavia sadamad: Kokkola (Soome), Getenburg (Rootsi). Sadamates kasutatakse tuhka reostunud pinnase stabiliseerimiseks.

Joonisel 1 olevas lisas 2 on toodud põlevkivituha proovivõtukohtade skeem Eesti elektrijaama CFBC katlal [9].

## **1.2. Reoveesete**

Reoveesete on reovete puhastamise kõrvaltoode. Sisaldab pinnasest eemaldatavaid aineid nende töötlemise teel. Küsimus sette otstarbekast majanduslikust ja samal ajal ka ökoloogilisest kasutamisest ei ole siiani üheselt lahendatud.

Linna kanalisatsioonisüsteemid transpordivad puhastusseadmetele harva vaid olmereovett. Puhastusseadmetele suunatakse ka tööstusreovesi ja teedelt ning muudelt pindadelt tulevad sademete äravoolud.

Reoveesete kujutab endast keerulist süsteemi, mis koosneb orgaanilisest ja mineraalosast. Reoveesete sisaldab väärtuslikke orgaanilisi aineid ja toiteelemente (lämmastik, fosfor jm.), mistõttu võiks olla kasulik väetisena või pinnaste parendajana. Samal ajal võivad settes sisalduda haigusttekitavad mikroorganismid, toksilised ühendid, raskemetallide ioonid ja muud inimtervisele ja keskkonnale ohtlikud ained.

Mistõttu tuleb kontrollida pinnases olevate potentsiaalselt toksiliste elementide kontsentratsiooni ja nende pinnasesse kandmise normi.

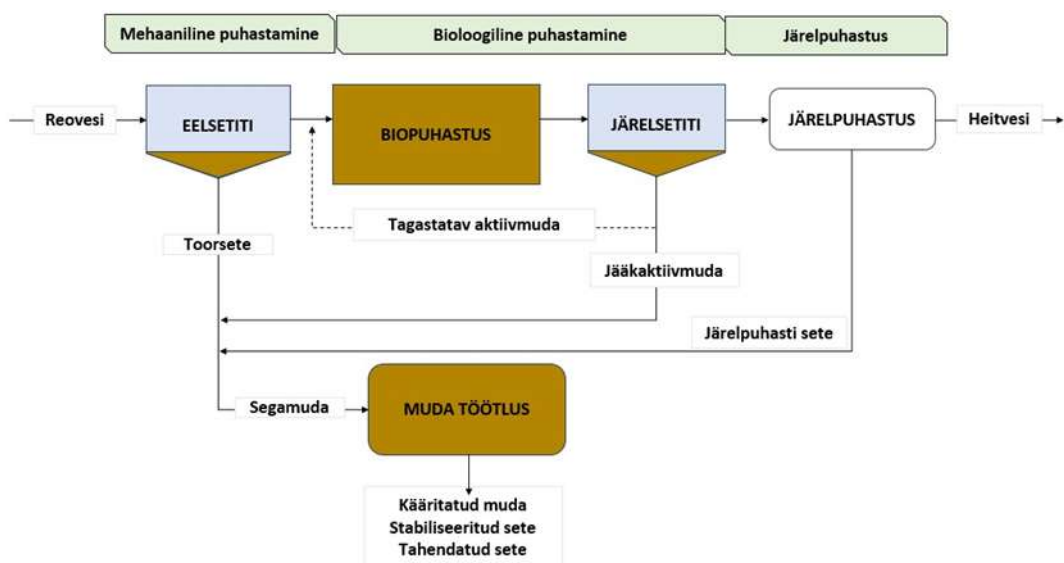
Puhastusseadmetel tekkivate niiskete setete maht moodustab 0,5 kuni 1% reovete mahust [10]. Setete kvaliteet sõltub tööstusreovete koostisest, ettevõtete lokaalsete puhastusseadmete ja linna/regionaalsete puhastusrajatiste töö efektiivsusest.

Vastavalt Euroopa Liidu jäätmete raamdirektiivile 2008/98/EÜ tuleb jäätmeid kasutada sekundaarsete ressursidena. See lubab üle minna tsirkulaarmajadusele [11].

Ülaltoodu valguses tuleb reoveesette toiteained suunata põllumajandusse, haljastusse ja rekultiveerimisse. See soodustab prügilasse veetava sette hulga vähendamist.

Eestis moodustub igal aastal umbes 150000 m<sup>3</sup> niisket reoveesetet [2].

Reoveesete leiab enim taaskasutust põllumajanduses – seda koguni 72,3 protsendi ulatuses. Haljastuse, rekultiveerimise ja muuks tarbeks kasutatakse 12,4 protsenti reoveesetest ning prügilasse ja ladustamisele suunatakse vastavalt 8,3 ja 7 protsenti. Kokku leiab taaskasutust 91 protsenti kogu reoveesetest [12].



Joonis 1.1 Reoveesette liigid [12]

Sõltuvalt tekkekohast jaotatakse reoveesetted kolmeks kategooriaks: toorsete, jääkaktiivmuda ja järeld puhasti sete (joon.1.1).

Sõltumata setete tüübist töödeldakse neid tavapäraselt üheskoos.

### Reoveesette koostis ja omadused

Reovete puhastamise protsessis moodustub erineva koostise ja omadustega sete, mis sõltub reoveeallikate spetsiifikast, aastaajast, puhastamise tehnoloogiast, puhastusseadmete kasutamise tingimustest jm. Keskmiselt sisaldab dehüdreeritud reoveesete 50–70% orgaanilisi aineid ja 30–50% mineraalkomponente (sealhulgas 1–

4% mitteorgaanilist süsinikku), 3,4–4,0% lämmastikku (N), 0,5–2,5% fosforit (P) ja olulisel hulgal muid toiteaineid, muuhulgas mikroelemente. See sete laguneb kiiresti ja võib esile kutsuda nitraatide ja reostavate ainete kontsentratsiooni tõusu pinnases, kui seda kasutada eelneva töötluseta. Kuid kõige suurem probleem on seotud saasteainetega: a) elusorganismide orgaaniliste (polütsükliilised aromaatsed süsivesinikud PAH, polükloreeritud bifenüülid PCB, adsorbeerivad organohalogeeneid, pestitsiidid, pindaktiivsed ained, hormoonid, farmaatsiapreparaadid); b) mitteorgaaniliste (raskemetallide ioonid) ja c) patogeensete liikidega (bakterid, viirused, lihtsad ja parasiithelmidid) [14].

Setete keemiline koostis võib suuresti erineda sõltuvalt puhastavate reovete koostisest. Tabelis 1.2 on ära toodud reoveesette keskmine koostis.

Tabel 1.2 Reoveesette keskmine koostis [15].

Näitaja	Keskmine väärtus
pH	7,5
Kuivaine (KA), %	38
Orgaaniline aine, % KA	74,5
Plii (Pb), mg/kg KA	7,5
Kaadmium (Cd), mg/kg KA	0,6
Kroom (Cr), mg/kg KA	17,3
Vask (Cu), mg/kg KA	78,3
Nikkel (Ni), mg/kg KA	6,9
Elavhõbe (Hg), mg/kg KA	0,3
Tsink (Zn), mg/kg KA	401,7
Üldlämmastik, mg/kg KA	50954,5
Üldfosfor, mg/kg KA	17563,6

Lisas 1 on toodud ettevõtte OÜ Järve Biopuhastus stabiliseeritud reoveesette koostis.

Reoveesette üheks väärtuslikumaks komponendiks on fosfor. Raskmetallide sisalduse poolest vastab suurem osa setetest rahvusvahelistele agroökoloogilistele nõuetele. Tabelis 1.3 on toodud raskmetallide keskmine sisaldus Eesti puhastusseadmete reoveesettes [16].

Tabel 1.3 Reoveesette raskmetallide sisaldused 40-s Eesti reoveepuhastis (mg/kg KA) [16]

	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Mediaan	1,53	16,3	92,9	0,31	12,4	13,8	489
Max	7,78	656	453	1,53	36,2	80	2480
Min	<1	2,45	9,74	0,02	1,28	2,25	3,83

Raskmetallide liikuvusele pinnases mõjub pinnase pH. Tabelis 1.4 on märgitud pH tähendused, mis määratlevad metalliliikuvust.



Tabel 1.4 pH piirväärtused metalliikuvuse soodustamiseks erinevates pindades [15]

<b>Metall</b>	<b>pH väärtus</b>
Zn	6,0...6,5
Cd	6,0
Ni	5,0...6,0
As	5,5...6,0
Cu	4,5
Pb	4,0
Al	2,5
Fe	2,5

Reoveesette pH keskmine tähendus moodustab 7,5, komposte aga reoveesetest - 6,4. Mis tähendab, et nende kasutamine ei tõsta oluliselt raskmetallide liikuvust.

### **Reoveesette töötamise meetodid**

Puhastamata reoveesetet on keelatud kasutada selle potentsiaalse ohu tõttu. Mistõttu rakendatakse puhastusseadmetel mõningaid stabiliseerivaid protsesse. Rakendatava tehnoloogia valik sõltub tugevasti puhastamata sette omadustest. Otsustavat tähendust stabiliseerimisprotsessile omavad sellised näitajad nagu pH, orgaaniliste hapete sisaldus, leeliselisus jm. Reoveesette töötlemise tüüpilisteks protsessideks puhastusseadmetel on paksendamine, stabiliseerimine, konditsioneerimine, dehüdratsioon ja lõplik eemaldamine.

**Setete paksendamine (tihendamine)** - on töötamise algstaadium, mis on mõeldud nende mahtude vähendamiseks. Teostatakse tihendiga paisupaakides, surveflotatsiooni seadmetes, hüdrotsüklonites, tsentrifuugides ja sepaatorites.

**Setete stabiliseerimine** on vajalik orgaanilise aine bioloogiliselt laguneva osa purustamiseks, millega ennetatakse setete mädanemist avatud õhu käes hoides. Orgaanilise aine stabiliseerimine toimub anaeroobsetes (metaankäärimine) või aeroobsetes tingimustes. Tööstuslikele reoveesetetele kasutatakse reeglina aeroobset stabiliseerimist (kestev säilitamine aerotankides), mille tulemusel laguneb mädanemisele kalduvate biolagunevate ainete põhiosa.

**Setete konditsioneerimine** on vajalik sette orgaanilise osa kolloidstruktuuri lagundamiseks ja veetootluse suurendamiseks. Põhiliselt kasutatakse konditsioneerimise reagentmeetodit.

**Setete dehüdreerimist** rakendatakse 50-80% niiskusega sette saamiseks. Kasutatakse nii setete kuivatamiseks mudaplatsidel (madal efektiivsus ja vajadus

maatükkidel), kui ka mehhaanilist dehüdreerimist: termiline kuivatamine, tsentrifuugimine, filterpressimine ja vaakumfiltreerimine [10].

Reoveesetete käärimisvõime ja tervisele tekitatava ohu vähendamiseks põllumajanduses kasutamisel allutatakse seda termilisele, bioloogilisele, keemilisele töötlusele või siis pikaajalisele säilitamisele.

### **Setete termiline desinfitseerimine**

Termilise desinfitseerimise kõige levinumaks meetodiks on pastöriseerimine. Selleks soojendatakse toorsetet ja liigmuda temperatuurini 55–100 °C ja hoitakse seda mõne aja vältel sellise temperatuuri juures. Sette töötlemine kõrgetel temperatuuridel lubab hävitada helmintide munad, patogeensed mikroorganismid ja viirused. Reoveesette desinfitseerimiseks ja samaaegseks kuivatamiseks kasutatakse pihustuskuivateid ja keevkihtgranulaatoreid. Desinfitseerimine lubab tõsta ka reoveesette käärimisvõimet [17].

### **Põletamine ja pürolüüs**

Reoveesette põletamist ja pürolüüsi tehakse erinevat liiki ahjudes. Alguses tuleb reoveesetted kuivatada ja dehüdreerida. Reoveesetete põletamisel tekivad põhiprobleem seisneb toksilisi ühendeid sisaldavate, samuti mõningal hulgal raskmetalle ja muid toksilisi aineid sisaldava tuha põlemisproduktide tekkimises. Samuti tekib pürolüüsi tulemusel tahke jääk. Tuha ja tahke jäägi pürolüüsi perspektiivseks suunaks peetakse nende kasutust ehitusmaterjalide tootmises.

### **Mesofiilne anaeroobne kääritamine**

Bioloogilise stabiliseerimise meetodite hulka kuulub anaeroobne kääritamine. Anaeroobset kääritamist kasutatakse esmastest setistitest ja liigaktiivmudast, samuti nende segudest orgaaniliste setete töötlemiseks. See on keeruline, paljude etappidega protsess, milles orgaanilised ained mineraliseeruvad, moodustades biogaasi ( $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$ ) ja käärimisjäägi. Moodustuvat biogaasi võib utiliseerida energeetilisteks ja soojusvajadusteks. Käärimisjääki võib kasutada väetisena. Protsessi korraldatakse metatankides temperatuuril 30–45 °C, tavaliselt 12–30 ööpäeva vältel. Mesofiilne anaeroobne kääritamine ei taga piisavat desinfitseerimist, mistõttu soovitatakse seda kombineerida setete eelneva töötlusega. Lisaks on setete orgaanilise aine lagunemise protsess 15–25% võrra madalam, kui termofiilse kääritamise korral piisava aja vältel [17]; [18].

### **Termofiilne anaeroobne kääritamine**

Nimetatud meetod tagab reoveesetete piisava desinfitseerimise. Protsessi korraldatakse termalsetes reaktorites temperatuuril 55–75 °C 5-10 ööpäeva vältel. Orgaaniliste ainete lagunemisaste moodustab 50-60%. [17].

### **Setete keemiline desinfitseerimine**

Reoveesetete desinfitseerimiseks kasutatakse keemilisi aineid, mida kasutatakse ka pinnase väetamiseks ja kahjulike pinnasmikroorganismide või umbrohtude hävitamiseks. Selliste ainete hulka kuuluvad ammoniaak (ammoniaagi vesilahus), tiatsioon, karbatioon, formaldehüüd jm.

Helmindimunade deformeerumine ja hävimine toimub setetessee kustutamata lubja lisamisel, mis leeliselise tõusuga koos tagab kustutamise protsessis setete temperatuuri tõusu. Lubja annus peab olema piisav pH taseme tõstmiseks kuni 12,0 ja tagama, et seda pH laagerdatakse vähemalt 2 tunni jooksul [19]. Kustutamata lubja nõutav kogus tuleb välja arvestada lähtudes sette temperatuuri tõstmise vajadusest kuni 60 °C ja enam. Lubjastamine lubab raskmetallid üle kanda seotud vormi. Reoveesetete kustutamata lubjaga desinfitseerimise meetodit rakendatakse mõningatel puhastusseadmetel Soomes, Rootsis, USA-s ja teistes riikides. Sette segamiseks lubjaga kasutatakse varbkolbsegistiga tigupumpasid, labasegisteid ja muid seadmeid [20].

### **Bioteermiline töötlus (komposteerimine)**

Bioteermilist töötlust teostatakse setete segamise teel täiteainetega (olmejäätmed, saepuru, turvas, peenestatud puukoor, sõnnik, taimejäätgid jm.) ja laagedamisega kuhjades, riitades, kraavides, fermentaatorites, trumlites jm. Seejuures toimub mikroorganismide elutegevuse tulemusel komposteerivate setete temperatuuri tõus kuni 55–72 °C, nende desinfitseerimine ja massi alanemine.

Komposteerimise alternatiiviks on vermikomposteerimine. See on kaasaegne, odav ja ökopuhas biotehnoloogia, milles vihmausse kasutatakse loomulike vihmareaktoritena orgaanilise aine lagunemiseks. Tulemusel alaneb sette maht 40–60% võrra, taimede jaoks tõuseb toiteainete biosaadavus, alaneb C/N suhe ja väheneb mõnede ohtlike reostajate, selliste kui metallid, saadavus

Kuigi komposteerimist võib pidada väga kasulikuks ja mittekalliks tehnoloogiaks, kutsub see ökoloogilisest vaatepunktist esile mõningaid tõsiseid probleeme. Lämmastikupõhise orgaanilise aine kiire lagunemise tõttu võib märkida lämmastiku olulist kadu ja kasvuhoonegaaside väljaviset. Taoliseid efekte võib osaliselt vähendada erinevate täiteainete, näiteks põlumajandusjäätmete ja leeliseliste lisandite, selliste kui lubi, tseoliit, bentoniit, biosüsi sisseviimisega. Vaatamata sellele esinevad teatud riskid,

mis on seotud pinnases raskmetallide, farmaatsiapreparaatide, samuti mõningate patogeenide kogunemisega.

### **Pinnase reoveesette utiliseerimine**

Seisneb reoveesette kandmises vahetult pinnasesse optimaalse normi juures (40–60 t/ha) üks kord 3-4 aasta tagant [22].

### **Reoveesette kasutus**

Reoveesette kasutamise põhisuundadeks on:

- 1) kasutamine põllumajanduses (vahetult väetisena) ning laastatud või degradeeritud maade taastamine;
- 2) energia korduvkasutus põletamise ja alternatiivsete termiliste meetodite, selliste kui pürolüüs ja gasifitseerimine või ühise põletamise (tsemenditehastes) teel;
- 3) muud, sellised kui matmine või merre heitmine, mis on paljudes riikides keelatud, kuid üha sagedamini praktiseeritakse mõningates maailmajagudes, peamiselt arenevates riikides.

### **Põllumajanduses kasutamine ja laostatud või degradeeritud maade taastamiseks**

Reoveesetted sisaldavad orgaanilisi aineid, taimedele vajalikke toiteelemente ja mikroelemente. Mistõttu on see reoveesetete puhastamise kõrvaltoode tunnustatud potentsiaalseks substraadiks väetamiseks põllumajanduses või reostatud territooriumite taastamiseks. Sete parandab osakeste poorsust, stabiilsust ning pinnaste vettpidavat võimet.

Samal ajal võivad koos reoveesettega sattuda pinnasesse soovimatud reostajad, sellised kui raskmetallid, patogeensed mikroorganismid jm, mis võivad kujutada endast sanitaar- ja ökoriske. Mõningatel juhtudel ei tohi reoveesetteid üldse kasutada, näiteks:

- pinnastel, millel kasvatatakse toitekultuure ja ravimtaimi, samuti viljapuid;
- karjamaadel, mida kasutatakse loomade karjatamiseks või põldudel söödakultuuride kasvatamiseks.

Allpool on toodud näited uuringutest reoveesetete kasutamisel erinevates riikides.

Poolas uuriti okaspuude tuhasegu ja reoveesetete toimet pinnasele maapirni (lad. *Heliánthustuberósus*) kasvatamisel. Uuring näitas, et segu lisamine pinnasesse suurendas oluliselt kaadmiumi ja tina sisaldust ja ei osutanud mõju nikli, tsingi ja fosfori sisaldusele. Sellest järeldati, et segu võib efektiivselt kasutada kaaliumi, kaltsiumi ja lämmastiku lisaallikana.

Türgis korraldati lagritsapõõsa (lad. *Glycyrrhiza lepidota*) kvaliteedi ja kasvu uuring reoveesetel kasvatamise korral. Katse tulemused näitasid, et reoveesetetega töötlemine tõstis oluliselt taimede kasvu ja nende arvukust.

Hiinas korraldati pojengide (lad. *Paeonia*) kasvatamisega seotud uuring, milles kasutati reoveesetete komposti (70%) ja maisipõhku (30%). Uuringud näitasid, et taimed, mida kasvatati 30-75% komposti sisaldusega substraadil, ilmutasid tugevat fütoftoroosi püsikindlust. Hiinas arvavad uurijad, et reoveesetete kasutamise suurimaks potentsiaaliks on linnahaljastus. Komposti soovitatav kogus hektari kohta moodustab 6 tonni ning mis väga tähtis, et sellise koguse juures ületavad raskmetallid lubatud piiri vaid 30 aasta pärast peale katkematut töötlemist.

Itaalias uuriti reoveesetete kasutamise komposti toimet pinnase füüsilistele omadustele eesmärgiga luua linna kahjustatud pinnase taimkattele parimad tingimused.

Venemaal tehti muru kasvatamisega reoveesetel seotud katsetused. Kasutati kohaliku pinnase segusid ja reoveesetteid. Parimat tulemust näitasid segud reoveesetete sisaldusega 25%.

Rootsis uuriti reoveesetete toimet tavamänni (lad. *Pinussylvestris*) 50-60 aastasele metsale. Lisades reoveesetet kuni 20 tonni hektari kohta, ei osutanud see negatiivseid tagajärgi ei puudele, ei pinnastele.

Leedus uuriti reoveesetete toimet nii tavamännile (lad. *Pinussylvestris*), kui arukasele (lad. *Betulapendula*). Maatükke töödeldi reoveesetetega koguses 300 tonni hektarile, see on 15 korda rohkem, kui rootsi katsetustes. Katse tulemusel selgus, et reoveesetetega töötlemine tõstab oluliselt pinnase niiskust, samuti alandab selle happelisust. Tõusis männi ja kase jõudlus [23].

Eestis uuriti erinevatel aastatel reoveesette toimet erinevate puuliikide, selliste kui arukask (lad. *Betulapendula*), harilik jalakas (lad. *Ulmusglabra*), harilik saar (lad. *Fraxinusexcelsior*), hobukastan (lad. *Aesculus hippocastanum*) jm. arengule. Keskmiselt kanti hektarile 110 tonni 27-28%-lise kuivaine sisaldusega ja pH 8,4 tasemega setet. Uuringute tulemused näitasid, et tõuseb pinnase kvaliteet ja alaneb selle erosioonitundlikkus. Reoveesette kasutusnõuete järgimisel ei kujuta see ohtu ei keskkonnale, ei inimeste tervisele [24].

Eestis kasutatakse reoveesetet põlevkivikarjääride rekultiveerimisel, maastiku disainil (haljastus) ja põllumajanduses. Rekultiveerimise korral kasutati töötlemata reoveesetteid turba kaevandamise kohtades, töödeldud reoveesetteid aga karjääride taastamisel. Lisaks kasutati töötlemata setteid biotiikide kallaste õgvendamiseks ja tugevdamiseks, pinnaste taastamiseks, visati laiali karjamaadele [2].

## **Reoveesetete energia taaskasutamine põletamise ja pürolüüsi teel**

Setete põletamine - reoveesetete töötlemise üks viimaseid etappe. Põletamise tulemusel hävitatakse täielikult orgaaniline osa, seega väheneb maht ja toimub reoveesetete desinfitseerimine. Seejuures kasutatakse setete põlevkomponentide kütteväärtust. Setete põletamist kasutatakse juhtudel, kui on võimatu ja majanduslikult otstarbekas kasutada setteid sekundaarsete toodetena utiliseerimise korral ja võimatuse korral neid ohutult ladustada. Reoveesetteid soovitatakse põletada peale nende kuivatamist. Kuivatatud setete kütteväärtus (niiskus 60-90%) moodustab kirjanduses olevate andmete põhjal 10-15 MJ/kg [25].

Eralduvat soojust võib kasutada sette kuivatamiseks ja põletamiseks vajaliku õhu soojendamiseks.

Pürolüüs ehk kuivdestillatsioon kujutab endast setete termilise töötlemise protsessi kõrgtemperatuurilise soojendamise teel õhu juurdepääsuta. Taolise ümbertöötlemise tulemusel saadakse täiesti kuivade ainete suhtes umbes 50% tahkeid jääke (pürokarboon), umbes 25% vedeltooteid (vaik või primaarne tõrv) ning 12-15% gaasitaoliseid tooteid. Pürolüüsi väärtuslikemaks toodeteks on pürokarboon ja vaik. Pürokarbooni võib kasutada aktiivsüsi saamiseks, vaiku aga vedelate süsivesinike, orgaaniliste aluste jm. saamiseks. Võib teha ka reoveesetete ja muude jäätmete ühist pürolüüsi [45].

### **1.3. Kääritatud reoveesete ja põlevkivituha ümbertöötlemine**

Tänapäeval on üha laiemat tunnustust saamas mahe põllumajandus ja mineraalväetiste kasutamise vähendamine. Sellega seotult pööratakse tähelepanu reoveesetetele ja nende segudele erinevate jäätmetega.

Erinevates riikides korraldati mistahes erinevas vahekorras puiduliikide saepuruga ja muude lisanditega reoveesetete komposteerimisega seotud uuringuid.

Eestis uuriti haavasaepuruga reoveesetete komposteerimist vahekorras 1:2 ja 1:3 kontrollitavates tingimustes [26].

Venemaal segati reoveesetteid puitsaepuruga ja keratiinjäätmetega (linnu suled) vahekorras vastavalt 1:2:0,5. Kompostide keemilise koostise analüüs näitas, et taoline reoveesetete utiliseerimisviis lubab saada kõrgekvaliteetseid ohutuid orgaanilisi väetiseid. [27].

Hiinas uuriti reoveesetetest, riisikestadest, turbast ja lendtuhast koostatud segude omadusi. Tulemused näitasid, et nimetatud komponentide optimaalne mass-suhe

moodustab vastavalt 57,25:16,20:39,75:36,06. Seejuures moodustas seemnete idanevus 70,3%, pinnases seostusid hästi raskmetallid [28].

2020.a korraldati Keskkonnainvesteeringute Keskuse (KIK) tellimusel uuring "Reoveesette kääritatud jäägi ja põlevkivituhha ringlussevõtt" [29].

Projekti eesmärgiks oli uurida granuleeritud orgaanilis-mineraalväetise saamise võimalust põlevkivituhast ja töötlemata või kääritatud reoveesetest.

Käesolevas uuringus analüüsiti läbi ja kasutati erinevat tüüpi ja päritolu reoveesetteid. Töös näidati, et töötlemata reoveesetteid väetisena kasutada ei tohi. Selleks, et sete vastaks sanitaarnõuetele, tuleb seda eelnevalt töödelda.

Põlevkivituhha ja kääritatud reoveesetete segamise teel võib saada väetise, mis sisaldab:

- 1) vähemalt 60% kuivainet;
- 2) vähemalt 2,5% N;
- 3) vähemalt 2% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>;
- 4) vähemalt 2% K<sub>2</sub>O;
- 5) vähemalt 7,5% orgaanilist süsinikku.

Mineraalväetiste lisamisega võib kliendi soovil reguleerida põhiliste toiteainete (NPK) sisaldust. Põlevkivituhk on kaltsiumi ja mikroelementide allikas ja soodustab segu granuleerimist. Reoveesete on orgaanilise süsiniku ja toiteelementide orgaaniliste vormide allikas. Selle toote toimet taimede kasvule ja arengule ei uuritud.

Tugevalt leeliseliste ühendite peenfraktsiooni (4,75 mm väiksema diameetriga) kõrge sisalduse tõttu võib lenduv põlevkivituhk olla keskkonnale ohtlik. Seetõttu peab tuhka granuleerima erinevate orgaaniliste materjalidega - reoveesetetega, sõnnikuga, kompostiga jm.

Autorid pakkusid välja kääritatud reoveesetest ja põlevkivituha pinnase granuleeritud parendaja tehnoloogilise skeemi (joon 1.2).



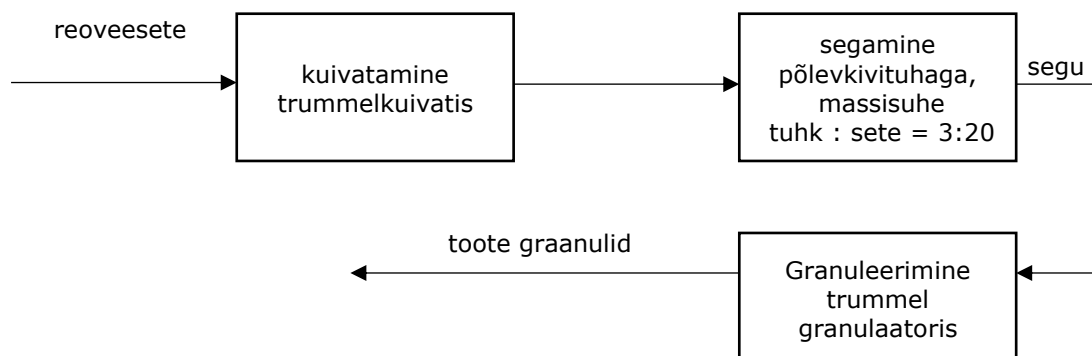
Joonis 1.2 Kääritatud reoveesete ja põlevkivituha granuleerimise tehnoloogiline skeem [16].

Töös näidati, et homogeensete ja ümarate graanulite saamiseks tuleb reoveesetted eelnevalt kuivatada ja peenestada. Piisavalt tugevate graanulite saamiseks tuleb kasutada sideaineid. Graanuli paakimise ennetamiseks tuleb graanuleid puuderdata konditsioneerivate lisanditega.



## 2. ARVUTUSLIK OSA

Joonisel 2.1 on toodud reoveesete ja põlevkivituha plokk-skeem. Vastavalt sellele skeemile on tehtud seadmete arvutused.



Joonis 2.1 Reoveesete ja põlevkivituha granuleerimise plokk-skeem

Algul arvutatakse reoveesete kuivatamise seadet, milleks on valitud kuivatustrummel. Kuivatatud reoveesete segatakse põlevkivituhaga massisuhtes tuhk : sete = 3:20. Komponentide segamiseks valiti tigusegisti. Pärast segamist suunatakse segu trummelgranulaatorisse, milles saadakse valmisprodukt – graanulid.

### 2.1. Trummelkuivati arvutus

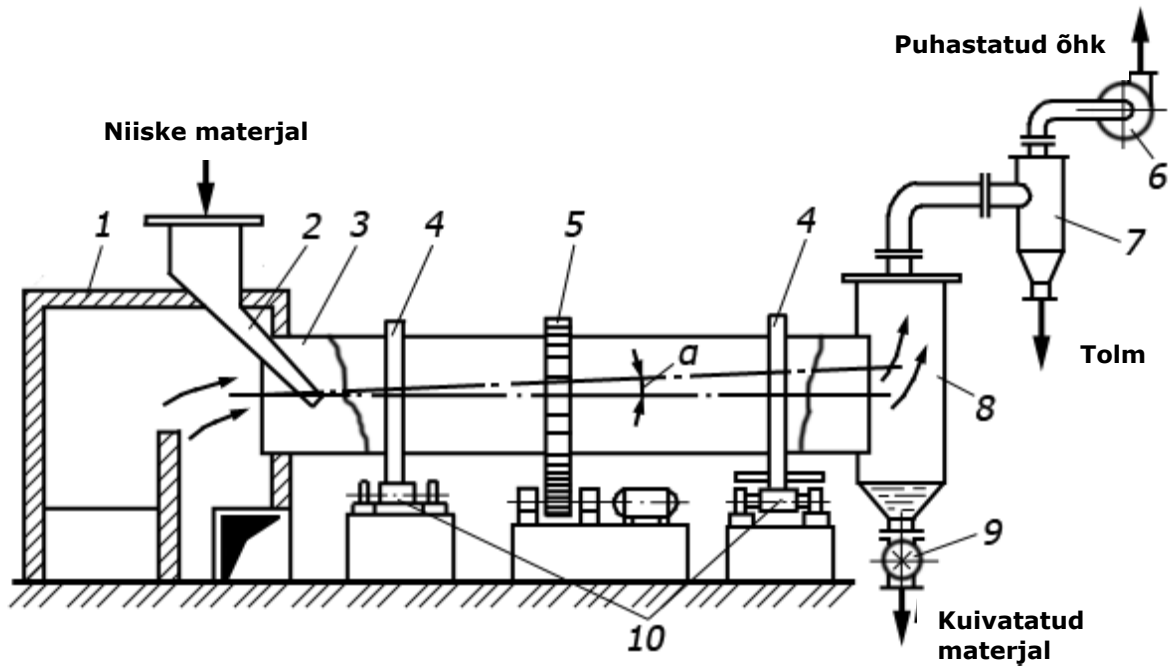
Termiline kuivatamine on mõeldud reoveesetete desinfitseerimiseks ja massi vähendamiseks. Enne kuivatusele andmist tuleb setted maksimaalselt veetustada. Peale termilist kuivatamist kujutab sete endast mittemädanevat, helmintidest ja patogeensetest mikroorganismidest vaba, väliselt kuiva (niiskusega 10-50%) puistematerjali.

Levinumaks on konvektiivne kuivatusviis, mille korral niiskuse aurustumiseks vajalik soojusenergia antakse kuivatatavale materjalile vahetult üle soojuskandjaga - kuivatusagendiga. Kuivatusagendina võib kasutada suitsugaase (elistatavam), ülesoojendatud auru või kuuma õhku.

Käesolevas töös valis autor trummelkuivati. Trummelkuivatid töötavad sette ja kuivatusagendi otsevoolu liikumisega skeemi alusel, millena kasutatakse suitsugaase. Kuivatamise protsessis muutub sette temperatuur 50–85 °C (keemine) kuni 30–40 °C (kuivatamise lõpus). Umbes 85 °C temperatuuri juures toimub sette ussitõrje.

Vedelate setete termiline töötlus nõuab niiskuse aurustamiseks suurt soojuskulu.

Joonisel 2.1 on näidatud trumlitüüpi kuivati.



Joonis 2.1 Trummelkuivati skeem: 1 – kolle; 2 – punker; 3 – trummel; 4 – bandaažid; 5 – hammasratas; 6 – ventilaator; 7 – tsüklon; 8 – vastuvõtupunker; 9 – lüüsiteide; 10 – tugirullikud [35]

Kuivatusagregaat koosneb koldest, kuivatuskambrist ja ventilatsiooniseadmest. Sisendi poolel asub laadimiskamber, väljundi poolel aga - väljalaadimiskamber. Kolle paikneb kuivatuskambrisse sisendi poolel. Äratöötatud gaaside imemiseks paigaldatakse ventilaator. Trummel on paigaldatud kaldega horisondi suhtes nurga all 3–4°, asetseb rullidel ning omab ajamit, millelt toimub pöörlemine. Suitsugaaside temperatuur kuivatisse sisendil 600–800 °C, sellest väljundil – 170–250 °C. Sete vajab enne trumliisse laadimist mõningast töötlust. Trumliisse saabuva sette niiskuses peab olema mitte üle 50%, vastasel juhul hakkab see kleepuma trumli sisepinna külge.

Sete liigub trumliis tänu suitsugaaside liikumisele ja trumli pöörlemisele. Trumli pöörlemiskiirus – 1,5–8 pööret/min. Sette ühtlaseks jaotamiseks trumli ristlõiget mööda paigaldatakse selle sisse otsakud (keerd-, laba- või sektorotsakud). Sette peenestamiseks ja segamiseks paigaldatakse kuivati algusesse ja lõppu laevaketid, mis riputatakse vabalt trumli sisepinnale.

Peale kuivatamist trummelkuivatis sete ei mädane, ei sisalda helminte ja patogeenseid mikroorganisme, niiskusesisaldus 20–30% [30].

Trummelkuivati arvutustel kasutati järgmised õppemetoodilised materjalid: Мясоденков, В.М. Расчет барабанной сушильной установки. [35]. Ветошкин, А.Г. Технические средства инженерной экологии [36]. Новикова, О.К. Обработка осадков сточных вод [34].

Põhiseadmete arvutus algab kuivatusseadme - trumli põhisõlme arvutusest, st selle mõõtude - diameetri ja pikkuse määramisest lähteandmete alusel ja nimelt: trumli mahulisest niiskuspingsest; niiske materjali kulust; materjali lähteniiskusest; materjali lõppniiskusest.

### **Kuivatustrumlist eemaldatava niiskuse koguse arvutus**

Lähteandmed arvutuseks:

Reoveesette aastane kogus Järve Biopuhastuses moodustab 10000 tonni aastas [15].

Kuivatustrumli remondi ja hoolduse seisakuks võtame 20 päeva aastas.

Kuna aastas on 365 päeva – 20 päeva (hooldus) = 345 tööpäeva.

345 päeva = 8280 tundi

Seadme tunnine tootlikkus:

10000 tonni (setteid)/8280 tundi = 1,207729 t/h tuleb ümber töödelda (kuivatada) = 1207,729 kg/h.

Sette lähteniiskus on 40,9% [29].

Sette niiskus pärast kuivatamist on 20%

### **Arvutused**

Määrame kuivmaterjali kulu:

$$G_{kuivmaterjal} = G_P(1 - W_P), \quad (2.1) [35]$$

kus  $W$  - kuivatustrumlist eemaldatava niiskuse kogus, kg/s;

$G_{kuivmaterjal}$  - kuivmaterjali kulu, kg/s;

$$G_{kuivmaterjali} = \frac{1207,729}{3600}(1 - 0,409) = 0,198269 \text{ kg/s.}$$

Määrame materjali suhtelise niiskuse trumli sisendil ja väljundil:

$$W = G_{kuivmaterjali}(U_1 - U_2), \quad (2.2) [35]$$

kus  $W$  - kuivatustrumlist eemaldatava niiskuse kogus, kg/s;

$G_{kuivmaterjali}$  - kuivmaterjali kulu, kg/c m/s;

$U_1$  ja  $U_2$  - materjali suhteline niiskus vastavalt trumliste sisendil ja trumlist väljundil, kg niiskust/kg kuivmaterjali.

$$U_1 = \frac{W_p}{1 - W_p} = \frac{40,9}{59,1} = 0,692 \text{ kg niiskust/kg kuivmaterjali};$$

$$U_2 = \frac{W_K}{1 - W_K} = \frac{20}{80} = 0,25 \text{ kg niiskust/kg kuivmaterjali}.$$

Määrame trumlist eemaldatava niiskuse koguse:

$$W = 0,198269(0,692 - 0,25) = 0,0876 \approx 0,088 \text{ kg/s}.$$

### Kuivatustrumli mõõdud

Aparaadi diameetri ja pikkuse võib määrata järgmiselt:

$$V = \pi \frac{\pi D_{trumt}^2}{4} L_{trumt} \quad (2.3) [35]$$

kus  $V$  – trumli maht;

$L_{trumt}$  – trumli pikkus;

$D_{trumt}$  – trumli diameeter.

Võtame  $L_{trumt}$  ja  $D_{trumt}$  vaheliseks suhteks  $m$ , siis

$$V = \pi \frac{\pi D_{trumt}^2}{4} m \cdot D_{trumt} = m \frac{\pi D_{trumt}^3}{4}$$

Teisest küljest võib aparadi maht võrduda

$$V = \frac{W}{H} \quad (2.4) [35]$$

kus  $H$  – niiskuse pinge.

Võrdsustades kahe viimase võrrandi paremad osad, saame

$$D_{trumt} = \sqrt[3]{\frac{4W}{m\pi H}} \quad (2.5) [35]$$

Määrame kuivatustrumli mõõdud, määrame niiskuse mahupinge 60 kg/m<sup>3</sup> tunnis,

$$V = \frac{0,088 \cdot 3600}{60} = 5,28 \text{ m}^3$$

Minimaalselt vajalik aparadi pikkus teadaoleva minimaalse vajaliku mahu ja aparadi teadaoleva diameetri korral määratakse võrrandiga:

$$L_{trumt} = \frac{4}{\pi D_{trumt}^2} \cdot V; \quad (2.6) [35]$$

$$L_{trumt} = \frac{4 \cdot 5,28}{3,14 \cdot 1,2^2} = 4,67091 \text{ m}$$

Trumli pikkuse lähim suurim tähendus on 6 meetrit [31].

$m$  relatsiooni ümberarvutus pikkusele 6 meetrit ja diameetrile 1,2 m,

$$m = \frac{6}{1,2} = 5;$$

$$D_{trumli} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 0,088 \cdot 3600}{5 \cdot 3,14 \cdot 60}} = 1,1039 \text{ m};$$

$$V = \frac{W}{H} = \frac{0,088 \cdot 3600}{60} = 5,28 \text{ m}^3$$

Leitud trumli diameetrit tuleb kontrollida trumlis oleva kuivatusagendi lubatud piirkiirusega,  $W_{kuivatusagendi}$  m/s.

Kuivatusagendi liikumiskiiruse määramiseks trumlis tuleb eelkõige välja arvutada selle tarbimiskulu (massiline ja mahuline).

### **Kuivatusagendi tarbimiskulu arvutus suitsugaasidega kuivatamise korral**

Kütusena võtame põlevkiviõli mille elementaarkoostis on järgnev [32]:

C - 82.5%

H - 10.3%

O - 6%

S - 1%

N - 0,2%

Tuhasisaldus < 1,2%

Niiskus max 1% [33]

### **Töökütuse koostise arvutus:**

Olgu tuhasus 1,0%, niiskus - 0,6%.

$$100\% - 1,6\% = 98,4\%$$

$$C^t = 82,5 \cdot 0,984 = 81,200\%$$

$$H^t = 10,3 \cdot 0,984 = 10,140\%$$

$$O^t = 6 \cdot 0,984 = 5,910\%$$

$$S^t = 1 \cdot 0,984 = 0,984\%$$

$$N^t = 0,2 \cdot 0,984 = 0,197\%$$

$$\text{Tuhasus: } 1 \cdot 0,984 = 0,984\%$$

$$\text{Niiskus: } 0,6 \cdot 0,984 = 0,585\%$$

$$\text{Summa} = 100\%$$

Töökütuse koostist võib esitada:

$$C^t = \frac{kg \text{ süsinikut}}{kg \text{ kütust}} + H^t \frac{kg \text{ vesinikut}}{kg \text{ kütust}} + S^t \frac{kg \text{ väävlit}}{kg \text{ kütust}} + O^t \frac{kg \text{ hapnikut}}{kg \text{ kütust}} + W^t \frac{kg \text{ niiskust}}{kg \text{ kütust}} + \psi^t \frac{kg \text{ tuhka}}{kg \text{ kütust}} + N^t \frac{kg \text{ lämmastikku}}{kg \text{ kütust}} \quad (2.7) [35]$$

Hapniku teoreetiline kulu 1 kg kütuse põlemisele:

$C + O_2 \rightarrow CO_2, \Rightarrow 1 \text{ kg C põletamiseks on vaja } 2,67 \text{ kg hapnikku.}$

$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O \Rightarrow 1 \text{ kg H}_2 \text{ põletamiseks on vaja } 8 \text{ kg hapnikku.}$

$S + O_2 \rightarrow SO_2 \Rightarrow 1 \text{ kg S põletamiseks on vaja } 1 \text{ kg hapnikku.}$

Järelikult võrdub hapniku teoreetiline kulu 1 kg kütuse põletamiseks:

$$L_{O_2} = (2,67 \cdot C^t + 8H^t + S^t - O^t) \frac{kg \text{ hapnikut}}{kg \text{ kütust}}, \quad (2.8) [35]$$

Õhus moodustab hapniku massisisaldus 23,2%, mistõttu võrdub õhu teoreetiline kulu 1 kg kütuse põletamiseks:

$$L_{kütus} = 4,31(2,67 \cdot C^t + 8H^t + S^t - O^t) \frac{kg \text{ hapnikust}}{kg \text{ kütust}} \quad (2.9) [35]$$

Esmase õhu tegelik erikulu on teoreetilisest suurem liigõhu koefitsiendist, mida võib määrata valemiga:  $\alpha = \frac{21}{21 - O_{2p}}$ , kus  $O_{2p}$  – õhu sisaldus põlemissaadustes (3+5%).

$$l_1 = L_{kütus} \cdot \alpha \quad (2.10) [35]$$

Esmase õhu tegelikku kulu arvutatakse valemiga:

$$L_1 = l_1 \cdot B, \quad (2.11) [35]$$

kus  $B$  – kütusekulu kg/s.

Esmase õhu tegeliku erikulu arvutus kuivatuskambri küttekambris, kui kütusena kasutatakse põlevkiviõli, hapniku sisaldust aga põlemissaadustes võib võtta võrdsena 5,91%.

Töökütuse koostis, %:

$C = 81,2;$

$H = 10,14;$

$O = 5,91;$

$S = 0,984;$

$N = 0,197;$

$\psi = 0,984;$

$W = 0,585.$

Määrame teoreetilise õhukulu 1 kg põlevkiviõli põletamiseks:

$$L_{kütus} = 4,31 \cdot (2,67 \cdot 0,812 + 8 \cdot 0,1014 + 0,984 - 0,0591) = 16,8268434 \approx 16,827 \frac{\text{kg õhku}}{\text{kg kütust}}$$

Määrame liigõhu koefitsiendi valemiga:

$$\alpha = \frac{21}{21 - 0_{2p}}, \quad (2.12) [35]$$

$$\alpha = \frac{21}{21 - 5,91} = 1,39165 \approx 1,4$$

Määrame esmase õhu tegeliku erikulu:

$$L_1 = 16,827 \cdot 1,4 = 23,5578 \approx 23,56 \frac{\text{kg õhku}}{\text{kg kütust}}$$

Suitsugaaside niiskusesisaldust määrame küttekambrist väljumisel, kui kütusena kasutatakse põlevkiviõli, kütuse põletamiseks kasutatakse pneumopõletit, st puhumiseks õhku ei kasutata.

$$X_0 = 0,008 \frac{\text{kg niiskust}}{\text{kg kuiva õhku}}$$

Esmase õhu erikulu on 23,56 kg täiesti kuiva õhku/kg kütust.

Eesmärgiga alandada suitsugaaside temperatuuri küttekambris (müüritise kaitseks kõrgete temperatuuride eest), suundub osa sekundaarõhust vahetult põlemiskambrisse  $L_2 = 25$  kg täiesti kuiva õhku/kg kütust.

Suitsugaaside niiskusesisaldust määrame valemiga:

$$x_{kütus} = \frac{l_1 \cdot x_0 \cdot W^t + 9H^t + W_{kütus}}{l_1 + 1 - \psi^t - 9H^t}, \text{ kg niiskust/kg kuivade suitsugaase.} \quad (2.13) [35]$$

arvestades, et: puhumiseks kasutatakse õhku, mitte aga veeauru, st  $W_{tuhk} = 0$  tuhasisaldus võrdub nulliga; esmase õhuga koos antakse küttekambrisse osa sekundaarõhust.

Lahendus:

$$x_m = \frac{L_1 \cdot X_0 + L_2 \cdot X_0 + W^t + 9H^t}{L_1 + L_2 + 1 - W^t - 9 \cdot H^t} \quad (2.14) [35]$$

kus  $x_0$  on õhuniiskus  $\frac{\text{kg niiskust}}{\text{kg kuiva õhku}}$ ;

$$x_m = \frac{23,56 \cdot 0,008 + 25 \cdot 0,008 + 0,00585 + 9 \cdot 0,01014}{23,56 + 25 + 1 - 0,00585 - 9 \cdot 0,01014} = 0,0098 \frac{\text{kg niiskust}}{\text{kg kuivade suitsugaase}} < a_3 < [34]$$

Arvutame välja aurustuva niiskuse koguse, kuivatatud reoveesette koguse, soojuse kulu materjalide soojendamiseks, soojuse kulu niiskuse aurustumiseks, soojuse üldkulu kuivatamiseks, soojuse erikulu niiskuse aurustumiseks, kütusekulu kuivatamiseks.

### Lähteandmed:

$G_1$  – mehhaaniliselt veetustatud reoveesette kogus 1207,729 kg/h;  
reoveesette algniiskus  $W_1 = 40,9\%$ ; niiskus kuivatist väljumisel  $W_2 = 20\%$ .

Kuivjäätmete lendmete koefitsient kuivatist ärajuhtivate gaasidega võrdub 0,85.

$t_1 = 800$  °C, kuivatusagendi (suitsugaasid) temperatuur kuivatisse sisenemisel;

$t_2 = 250$  °C, kuivatusagendi (suitsugaasid) temperatuur kuivatist väljumisel;

$t_{M1} = 20$  °C, kuivatamisele suunatava reoveesette temperatuur;

$t_{M2} = 70$  °C, reoveesette temperatuur kuivatist väljumisel;

$C_M = 3,98$  kJ/(kg·K), jäätmete soojusmahtuvus, [33];

$q_T = 40000$  kJ/m<sup>3</sup>, kütuse madalaim kütteväärtus, [33]

$A = 60$  kg sur.niiskust./(m<sup>3</sup>·h), trumli niiskuspinge;

$Q_{soojuskadu} = 0,1 Q_{niiskuse aurustamist}$ , soojuskadu keskkonda;

$D_{trummel} = 1,2$  m, kuivati trummli diameeter;

Kuivati trumli täitumist arvestav koefitsient 1,2;

kolde kasutegur  $\eta = 0,82$ ;

Aurustuva niiskuse kogus  $W = 0,088$  kg/c = 316,8 kg/s

### Kuivatist väljalaaditava sette kogus materiaalse bilansi võrrandi alusel

$$G_1 = G_2 + W, \quad (2.15) [34]$$

kus  $G_1, G_2$  – niiske ja kuivatatud materjalide kogus, kg/s;

$$G_2 = 0,85(G_1 - W) = 0,85 \cdot (1207,729 - 316,8) = 757,3 \text{ kg/h.}$$

Soojuskulu niiskuse aurustumiseks:

$$Q_{niiskuse aurustumist} = W(r_0 + c_{veeauru}t_2 - c_{aurustanud niiskust}t_{M.1}), \quad (2.16) [34]$$

kus  $Q$  – soojuskulu;

$r_0$  – vee aurustumissoojus;

$C_{veeauru}$  – veeauru soojusmahtuvus;

$C_{aurustanud niiskust}$  – aurustanud niiskuse soojusmahtuvus;

$t_{M.1}$  – materjali temperatuur

$$r_0 = 2490 \text{ kJ/kg}; C_{veeauru} = 1,97 \text{ kJ/kg};$$

$$C_{aurustanud niiskust} = 4,19 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K.}$$

$$Q_{niiskuse aurustumist} = \frac{316,8(2490+1,97 \cdot 250 - 4,19 \cdot 20)}{3600} = 255,0856 \approx 255 \text{ kW.}$$



Soojuskulu reoveesette soojendamiseks:

$$Q_M = G_2 c_M (t_{M,2} - t_{M,1}), \quad (2.17) [34]$$

kus  $c_M$  – materjali erisoojus, J/(kg·K);

$t_{M,2}$  – materjali temperatuur kuivatisse sisendil, °C.

$$Q_M = \frac{757,3 \cdot 3,98 \cdot (70 - 20)}{3600} = 41,9 \text{ kW}$$

Soojuskaod keskkonda:

$$Q_{soojuskadu} = 0,1 \cdot Q_{niiskuse \text{ aurustumist}}, \quad (2.18) [34]$$

kus 0,1 – soojuskaod koefitsient;

$$Q_{soojuskadu} = 0,1 \cdot 255 = 25,5 \text{ kW}$$

Soojuse üldkulu kuivatamisele:

$$Q = Q_{niiskuse \text{ aurustumist}} + Q_M + Q_{soojuskadu};$$

$$Q = 255 + 41,9 + 25,5 = 322,4 \text{ kW}$$

Soojuse erikulu niiskuse aurustumisele:

$$Q_{niiskuse \text{ aurustumist}} = \frac{Q}{W}; \quad (2.19) [34]$$

$$Q_{niiskuse \text{ aurustumist}} = \frac{322,4 \cdot 3600}{316,8} = 3664 \text{ kW/kg}$$

Kütusekulu kuivatamisele

$$V_{kütus} = \frac{Q}{q_{kütus} \eta}; \quad (2.20) [34]$$

$$V_{kütus} = \frac{322,4 \cdot 3600}{40000 \cdot 0,82} = 35,4 \text{ m}^3/\text{h}$$

Arvestades kütuse tihedust 1000 kg/m<sup>3</sup> [33] on kütuse kulu massiühikutes 35,4 t/h.

## 2.2. Segisti arvutus

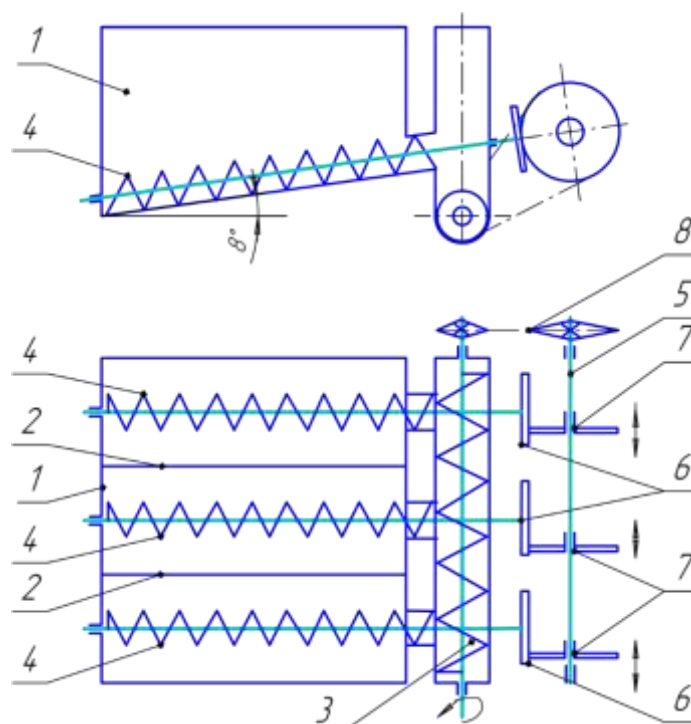
Segisti arvutustel kasutati järgmised õppemetoodilised materjalid: Старшов, Г.И., Никоноров С.Н., Никитин, А.И. Основы проектирования и расчет технологического оборудования пищевых предприятий [36].

Valime ja arvutame segisti kolme tiguseguriga (joonis 2,2) tootlikkusega  $Q = 1500 \text{ kg/h}$  geomeetrilised ja kinemaatilised parameetrid. Doseerimist tehakse tigudosaatoritega, segamist aga toote transportimise protsessis. Segu koosneb reoveesetest –  $A=20\%$

puistetihedusega  $\rho_1 = 700 \text{ kg/m}^3$  [37] ja põlevkivituhast niiskusega  $C=0,85\%$  ning puistetihedusega  $\rho_2 = 2740 \text{ kg/m}^3$  [38].

Veesisaldus segus  $B = 15\%$ .

Lähtekomponentide segamiseks kasutame kolme tiguseguriga proportsionaalset segistit, mille skeem on esitatud joonisel 2.2. Töötab nimetatud segisti järgmiselt. Erinevad komponendid puistatakse punkrisse (1). Sealt suunatakse doseerivate tigudega (4) kogumise segamisteosse (3), kus toimub komponentide vahetu segamine. Doseerivate tigude (4) pöörlemist teostatakse segamisteost (3) läbi ahelülekanne (8) nukkvõllile (5), seejärel suunatakse pöörlemine tappketastega (7) kiirketastele (6), mis panevad doseerivad teod (4) pöörlema. Doseeriva teo (4) pöörlemist muudetakse tappketta (7) teisaldamise teel piki nukkvõlli (5) ja tappketta (7) haakumise muutmisega teise rea avadega, mis paiknevad kiiruskettal (6) kontsentriliselt



Joonis 2.2 Kolme tiguseguriga segisti: 1 – punker; 2 – vaheseinad; 3 – segamistigu; 4 – doseerivad teod; 5 – nukkvõll; 6 – kiirkettad; 7 – tappketid; 8 – ahelülekanne [36]

pöörlemistelje suhtes.

Võtame sette ja tuha vahekorraks: 100% sette kohta on vaja 15% tuhka. Segamisteo arvutuse teeme niiskuse põhjal, et väljundil oleks toote veesisaldus  $B = 15\%$ , siit määrame reoveesette  $A$  massi  $Q_A$  ja põlevkivituhha  $C$  massi  $Q_C$ .

$$A = 20\% > B = 15\% > C = 0,85\%.$$

Määrame  $Q_A$  ja  $Q_C$  massi:

$$Q_A = \frac{1500 \cdot 100}{15 + 100} = 1304,3 \text{ kg/h};$$

$$Q_C = \frac{1500 \cdot 15}{15 + 100} = 195,65217 \approx 195,7 \text{ kg/h}.$$

Segu mahutiheduse  $\rho_{\text{segu}}$  määrame valemiga:

$$\rho_{\text{segu}} = \frac{\rho_1 \cdot m_1 + \dots + \rho_K \cdot m_K}{m_1 + \dots + m_K}, \quad (2.21) [36]$$

kus  $\rho_K$  – segusse kuuluvate komponentide mahutihedus,  $\text{kg/m}^3$ ;

$m_K$  – segusse kuuluvate eraldi komponentide mass, kg, teades eraldi komponentide tihedust ja massi:

$$\rho_{\text{segu}} = \frac{700 \cdot 1304,3 + 2740 \cdot 195,7}{1304,3 + 195,7} = 966,2 \text{ kg/m}^3.$$

Määrame segamistee diameetri  $D$  ja sammu  $S$  valemist:

$$R_0 = \frac{C^2}{12 \cdot F_1}, \quad (2.22) [36]$$

kus  $C$  – segmendi kõõlu pikkus, mm, teades teo täituvuse koefitsienti;

$\psi = 0,3$ ; koefitsient, mis sõltub veose liigist vabalt voolavatele veostele;

$k = 0,8$ ; koefitsient, mis arvestab teo kaldenurka;

$C = 1,0$ , kuna teo kaldenurk võrdub nulliga,

Vabalt voolavate toodete jaoks võtame  $S=D$ . Valime teo pöörlemissageduse

$$n = 40 \text{ min}^{-1} = 0,67 \text{ c}^{-1}.$$

Siit võrdub teo diameeter:

$$D = \sqrt[3]{\frac{Q}{47 \cdot \psi \cdot n \cdot \rho_{\text{segu}} \cdot K \cdot C}}, \quad (2.23) [36]$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{1500}{47 \cdot 0,3 \cdot 966,2 \cdot 0,8 \cdot 1}} = 0,1509 \text{ m}$$

Võtame teo diameetriks  $D = 0,16 \text{ m} = 160 \text{ mm}$ , teo võlli diameetriks  $d = 0,04 \text{ m} = 40 \text{ mm}$ , teo sammuks  $S = D = 0,16 \text{ m} = 160 \text{ mm}$  [39].

Teo maksimaalse pöörlemissageduse  $n_{\text{max}}$  ( $\text{min}^{-1}$ ) määrame valemiga

$$n_{\text{max}} = \frac{A_B}{\sqrt{D^2}}, \quad (2.24) [36]$$

koefitsiendi  $A_B$  valime (lisast 3)  $A_B = 45$ , siis:

$$n_{\text{max}} = \frac{45}{\sqrt{0,16}} = 112,5 \text{ min}^{-1},$$

kus tingimused  $n = 40 < n_{\text{max}} = 112,5$  on täidetud, järelikult on segamistee geomeetrised ja kinemaatilised parameetrid valitud õigesti.

Määrame konstruktiivselt etteandetigude (doseerivate tigude) mõõdud (teo diameeter  $D_p = 0,10$  m; võlli diameeter  $d_p = 0,03$  m; teokruvi samm,  $t_p = D_p$ ). Segisti konstruktsioon on teostatud selliselt, et etteandetigudel oleks kolm erinevat pöörlemissagedust, mida määratakse valemitega:

$$n_{max} = \frac{4 \cdot Q_{min}}{[\pi \cdot (D_{etteandetigu}^2 - d_{etteandetigu}^2) \cdot S_p \cdot \rho \cdot \psi]}, \quad (2.25) [36]$$

$$n_{min} = \frac{4 \cdot Q_{min}}{[\pi \cdot (D_{etteandetigu}^2 - d_{etteandetigu}^2) \cdot S_{etteandetigu} \cdot \rho \cdot \psi]}, \quad (2.26) [36]$$

$$n_{kesk} = \frac{n_{min} + n_{max}}{2}, \quad (2.27) [36]$$

kus  $Q_{max}$  ja  $Q_{min}$  - maksimaalne ja minimaalne seadistatud etteandetigude tootmisvõimsus.

Võttes teo täitumise koefitsiendiks  $\psi = 0,9$  ja etteandetigude arvuks  $k = 3$  leiame

$$Q_{max} = 0,03128 \text{ kg/s}, \quad Q_{min} = 0,1043 \text{ kg/s}.$$

Doseeriva teo maksimaalne pöörlemiskiirus:

$$n_{max} = \frac{4 \cdot 0,3128}{[3,14 \cdot (0,1^2 - 0,003^2) \cdot 0,1 \cdot 2740 \cdot 0,9]} = 1,5981 \text{ s}^{-1} = 95,89 \text{ min}^{-1}$$

Doseeriva teo minimaalne pöörlemiskiirus:

$$n_{min} = \frac{4 \cdot 0,1043}{[3,14 \cdot (0,1^2 - 0,03^2) \cdot 0,1 \cdot 700 \cdot 0,9]} = 0,231757 \text{ s}^{-1} = 13,91 \text{ min}^{-1}$$

Doseeriva teo vahepealne pöörlemiskiirus:

$$n_{kesk} = \frac{1,598 + 0,232}{2} = 0,915 \text{ s}^{-1} = 54,9 \text{ min}^{-1}.$$

Nukkvõlli pöörlemissageduseks võtame:

$$n_p = n_{max} = 1,598 \text{ s}^{-1}.$$

Ketta kiirusele, millel on kolm rida kontsentriselt paiknevaid avasid, määrame kindlaks avade arvu igas reas, proportsionaalselt doseerivate tigude pöörlemissagedustele. Esimeses reas võtame konstruktiivselt ridade arvuks  $z_1 = 10$ ,

teises reas on avade arv:

$$z_2 = (n_{max} \cdot (n_{min} / n_{kesk})) / n_{min} \cdot z_1 \quad (2.28) [36]$$

$$z_2 = (1,598 \cdot (0,232/0,915))/0,232 \cdot 10 = 17,5;$$

võtame  $z_2 = 18$ .

Kolmandas reas on avade arv:

$$z_3 = (n_{\max}/n_{\min}) \quad (2.29) [36]$$

$$z_1 = (1,598/0,232) \cdot 10 = 68,87931 \approx 69.$$

Tapptähekeste hammaste arvuks võtame  $z_{\text{uee}} = z_1 = 10$ . Määrame jahusegisti tootlikkuse koefitsiendi valemiga:

$$a = \frac{(n_1 + n_2 + n_3) \cdot 100}{K \cdot n_{\max}}, \quad (2.30) [36]$$

$n_1, n_2, n_3$  – tigude pöörlemiskiirus.

Kuna segatakse kaht komponenti, on etteandetigude arv  $k=2$ , kasutatavate etteandetigude pöörlemissagedus arvutatud välja juba varem ning moodustab  $n_1 = 1,598 \text{ c}^{-1}$ ,  $n_2 = 0,232 \text{ c}^{-1}$ .

$$a = \frac{(1,598 + 0,232) \cdot 100}{2 \cdot 1,598} = 57,25907\% \approx 57,3\%$$

Kontrollime segusse kuuluvate komponentide A ja C doseerimise õigsust igas variandis (%), valemiga

$$C = \frac{n_A}{n_A + n_1 + n_2} \cdot 100, \quad (2.31) [36])$$

kus  $n_A$  - A komponenti teisdava teo pöörlemissagedus võrdub  $n_A = n_1 = 1,598 \text{ c}^{-1}$ ,  
C komponenti teisdava teo pöörlemissagedus võrdub  $n_C = n_2 = 0,232 \text{ c}^{-1}$ ,

$$C_A = \frac{1,598}{1,598 + 0,232} \cdot 100 = 87,3224 \approx 87,3\%$$

$$C_C = \frac{0,232}{1,598 + 0,232} \cdot 100 = 12,6776 \approx 12,7\%$$

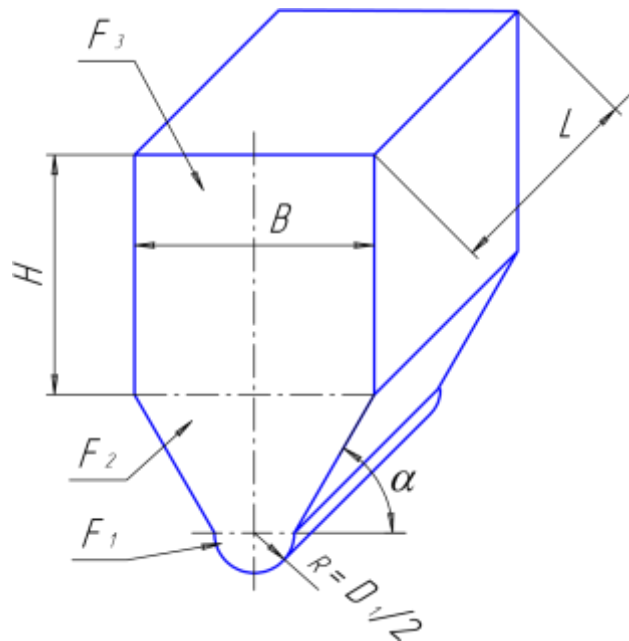
Arvestustest nähtuvalt on komponendi A sisaldus segus  $C_A = 87,3\%$ , mis vastab esimese doseeriva teo tootlikkusele  $Q_A = 1304,3 \text{ kg/h}$ , ning komponendi C sisaldus segus  $C_C = 12,7\%$ , mis vastab teise doseeriva teo tootlikkusele  $Q_C = 195,7 \text{ kg/h}$ , järelikult on doseerivate tigu geomeetrised ja kinemaatilised parameetrid valitud õigesti.

Valime põlevkivituha ja reoveesette etteandmispunkrite konstruktsioonid. Joonisel 2.3 esitletud punkrite skeem koosneb kolmest elemendist: alumises osas pool teorenni diameetrist, keskmises osas ümberpööratud trapets loomulikust kaldenurgast suurema külje kaldenurgaga  $\alpha = 60^\circ > \varphi_0$ , ülemises osas riskülik küljega  $B = 3,46 \text{ m}$ , mis on

võetud konstruktiivselt. Ristküliku kõrguse võtame konstruktiivselt  $H = 4,8$  m. Massi võtame väiksema puistetiheduse (sete) põhjal, mis on arvestatud 8-tunniliseks katkematuks tööks.

$$1304,3 \cdot 8 = 10434,4 \text{ kg}$$

$$m = 10434,4$$



Joonis 2.3 Punkri skeem [36]

Täituvuse koefitsiendiks võtame  $\psi_1 = 0,8$ , puistetiheduse valime väiksema  $\rho_2 = 700 \text{ kg/m}^3$ . Siis määrame salvesektsiooni mahu avaldisest:

$$V = \frac{m}{\rho \cdot \psi}; \quad (2.32) [36]$$

$$V = \frac{10434,4}{700 \cdot 0,8} = 18,633 \text{ m}$$

Salvesektsiooni ristlõike pindala  $F$  ( $\text{m}^2$ ) koosneb vastavalt kolmest pindalast: renni pindalast  $F_1$ ; ümberpööratud trapetsi pindalast  $F_2$ ; ristküliku pindalast  $F_3$  ning määratakse avaldisest:

$$F = F_1 + F_2 + F_3; \quad (2.33) [36]$$

$$F = \frac{\pi \cdot D_1^2}{8} + \frac{(D+B) \cdot (B-D_1) \cdot \text{tg} \alpha}{2 \cdot 2} + B \cdot H; \quad (2.34) [36]$$

$$F = \frac{3,14 \cdot 0,1^2}{8} + \frac{(0,1 + 3,46) \cdot (3,46 - 0,1) \cdot \text{tg} 60^\circ}{2 \cdot 2} + 3,46 \cdot 4,8 = 21,79145 \text{ m}^2$$

Salvesektsiooni pikkuse  $L$  (m) määrame avaldisest:

$$L = \frac{V}{F} = \frac{18,633}{21,791} = 0,8551 \text{ m}. \quad (2.35) [36]$$

Võtame salvesektsiooni pikkuseks  $L = 0,9$  m. Võimsust, mis on vajalik segamistee ajamile  $N_1$  (kW), määrame valemiga

$$N_1 = g \cdot Q_{max} \cdot L_c \cdot \omega \cdot k_3 \cdot 10^{-3} \quad (2.36) [36]$$

kust  $N = 0,064 + 0,001 \cdot 3 = 0,067$  kW,

võttes segamistee pikkuseks  $L_{segamistigu} = 2,5$  m;

liikumistakistuse koefitsiendiks  $\omega = 5$ ;

võimsusvaru koefitsiendiks  $k_3 = 1,25$ .

Siit:

$$N_1 = \frac{9,81 \cdot 1500 \cdot 2,5 \cdot 5 \cdot 1,25 \cdot 10^{-3}}{3600} = 0,064 \text{ kW,}$$

Võimsuse, mis on vajalik etteandetigude (doseerivate tigude)  $N_2$  (kW) ajamile, määrame valemiga, etteandetigude kaldenurk horisondi suhtes ( $\alpha = 8^\circ$ ). Etteandeteo pikkuse  $L_{etteandetigu}$  (m) määrame, lisades konstruktiivselt täisarvuni doseeriva kanali suuruse  $\Delta = 0,09$  m:

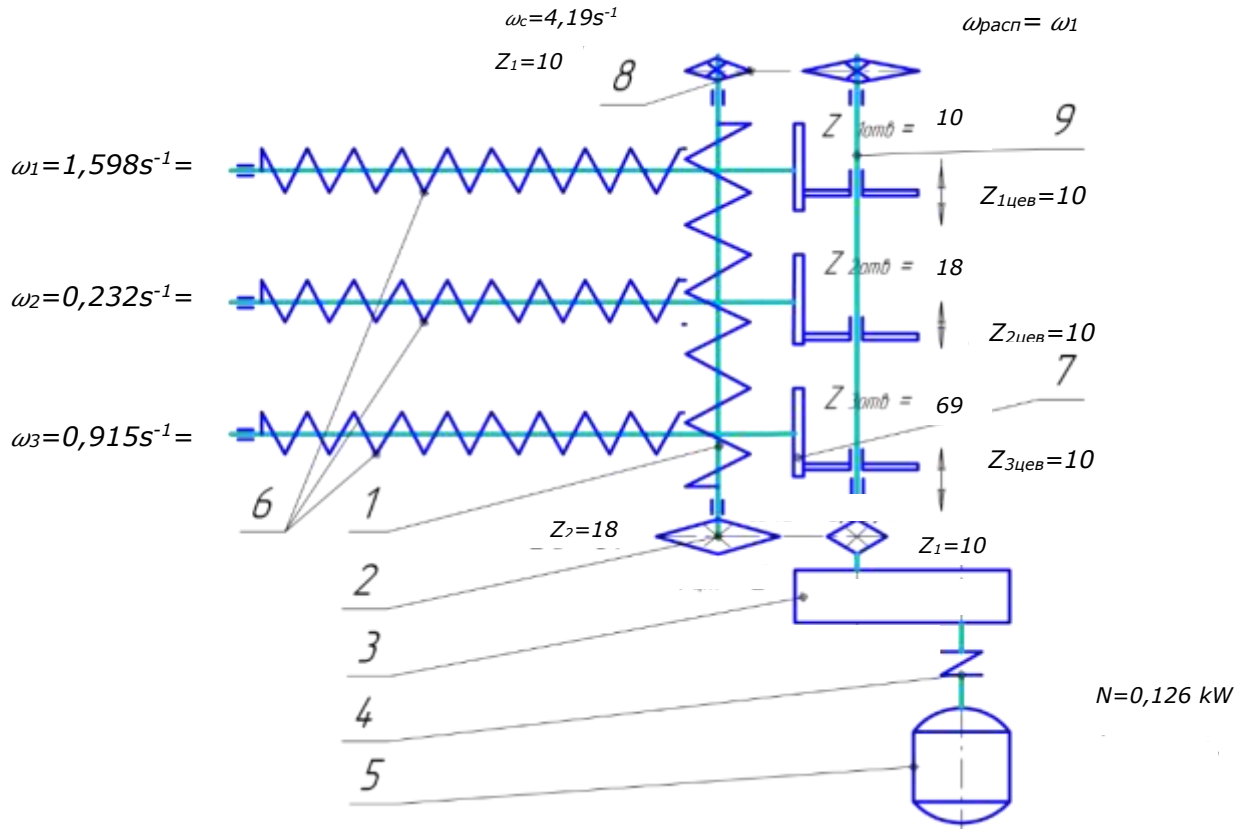
$$L_{etteandetigu} = \frac{L}{\cos 8^\circ} + \Delta = \frac{0,9}{\cos 8^\circ} + 0,9 = 0,999 \text{ m}$$

Etteandva teo pikkuseks võtame  $L_{etteandetigu} = 1,0$  m.

$$N_2 = g \cdot Q_{max} L_{etteandetigu} \cdot (\sin \alpha + \omega + \cos \alpha) \cdot 10^{-3} \quad (2.37) [36]$$

$$N_2 = \frac{9,81 \cdot 1500 \cdot 1,0 (\sin 8 + 5 \cdot \cos 8) \cdot 10^{-3}}{3600} = 0,001 \text{ kW}$$

Segamisteo pöörlemissagedusega  $n = 40 \text{ min}^{-1} (\omega_c = 4,19 \text{ s}^{-1})$  ja doseerivate tigude sagedusega  $n_1 = 95,89 \text{ min}^{-1} (\omega_1 = 1,598 \text{ s}^{-1})$ ;  $n_2 = 13,91 \text{ min}^{-1} (\omega_2 = 0,232 \text{ s}^{-1})$  ja  $n_3 = 54,9 \text{ min}^{-1} (\omega_3 = 0,915 \text{ s}^{-1})$  tagamiseks töötame välja teosegisti kinemaatilise skeemi. Kinemaatiline skeem on toodud joonisel 2.4.



Joonis 2.4 Kinemaatiline skeem: 1 – segamistigu; 2 – ahelülekanne; 3 – reduktor; 4 – muhv; 5 – elektrimootor; 6 – doseerivad teod; 7 – tappülekanne; 8 – ahelülekanne; 9 – jaotusvõll [36] Elektrimootorilt läbi muhvi tulev jõumoment antakse üle reduktori kiirekäigulisel võllil, reduktori madalkäiguliselt võllilt läbi ahelülekanne antakse jõumoment üle segamisteo võllile, millelt samuti antakse ahelülekanne üle nukkvõllile, edasi antakse jõumoment tappülekanne abil doseerivatele tigudele. Ajami kasuteguri määrame valemiga:

$$R_0 = R + \frac{h}{3 \cdot t \cdot g \varphi'} \quad (2.38) [36]$$

võttes teatmiku [5] alusel ajami elementide kasuteguri tähendused. Reduktori kasutegur  $\eta_{\text{red}} = 0,8$ , ahelülekanne kasutegur  $\eta_{\text{ahelülekanne}} = 0,95$ , tappülekanne kasutegur  $\eta_{\text{tappülekanne}} = 0,9$ ,

$$\text{siis: } \eta = 0,8 \cdot 0,95^2 \cdot 0,9^3 = 0,53.$$

Elektrimootori võimsust määrame valemiga:

$$N_{\text{el.motoori}} = \frac{(N_1 + N_2 \cdot k)}{\eta} \quad (2.39) [36]$$



$$N_{el.motoori} = \frac{0,064 + 0,001 \cdot 3}{0,53} = 0,126 \text{ kW.}$$

### 2.3. Granulaatori arvutus

Trummelgranulaator-kuivati arvutusest saame toote kihi soojusmahtuvuse ja tiheduse, samuti toote lahustumissoojuse. Tuha soojusmahtuvuse võtame tabelist 6-2 [44]. Põlevkivituha soojusmahtuvus 100 °C juures = 0,7955 kJ/(kg·K). Reoveesete keskmine soojusmahtuvus võrdub 2,0 kJ/(kg·K) [40].

Granulaatori tootlikkus on 1500 kg/h (sh põlevkivituht  $Q_A = 1304,3$  kg/h ja reoveesete  $Q_C = 195,7$  kg/h)

Segu protsentuaalne koostis:

$$x_1 = \frac{1304,3}{1500} \cdot 100 = 86,95\%$$

$$x_2 = \frac{195,7}{1500} \cdot 100 = 13,05\%$$

Leiame segu keskmise soojusmahtuvuse:

$$2,0 \cdot 0,8695 + 0,7955 \cdot 0,1305 = 1,84 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Toote tiheduse leiame analoogiliselt:

$$700 \cdot 0,8695 + 2740 \cdot 0,1305 = 966,22 \text{ kg/m}^3$$

Toote lahustamissoojuse võtame vaba CaO alusel (18 350 cal/mol, [41]).

Arvestades, et vaba CaO sisaldus põlevkivituhas on 22,37%, võrdub põlevkivituha lahustumissoojus 17,02 kJ/kg

#### Lähteandmed

Toode - pulbermaterjal;

tootlikkus  $G_{tootlikkust} = 1500$  kg/h;

lõpp-produkti niiskus  $W_{tootlikkust} = 1\% = 0,01$ ;

trummelgranulaatorist väljuva toote graanulite keskmine diameeter  $d_{toode} = 2$  mm;

toote kihi tihedus  $\rho_{toode} = 966,22$  kg/m<sup>3</sup>;

toote soojusmahtuvus  $c_{toode} = 1,84$  kJ/(kg·K);

lahustumissoojus  $q_{toode} = 17,02$  kJ/kg ;

segu niiskus aparati sisenemisel  $W_{segu} = 0,15$ ;

segu temperatuur aparati sisenemisel  $t_{segu} = 20$  °C;

kuivatuse lubatud temperatuur  $t_{kuiv} = 100$  °C;

äratöötatud kuivatusagendi suhteline niiskus (tingimusest toote niiskuse saavutamine kuivatamise temperatuuri juures)  $\varphi_2 = 25\%$ ;

kuivatamise aeg  $\tau = 0,5$  h;

välisõhusegu hajutav rõhk  $p = 0,3$  MPa;

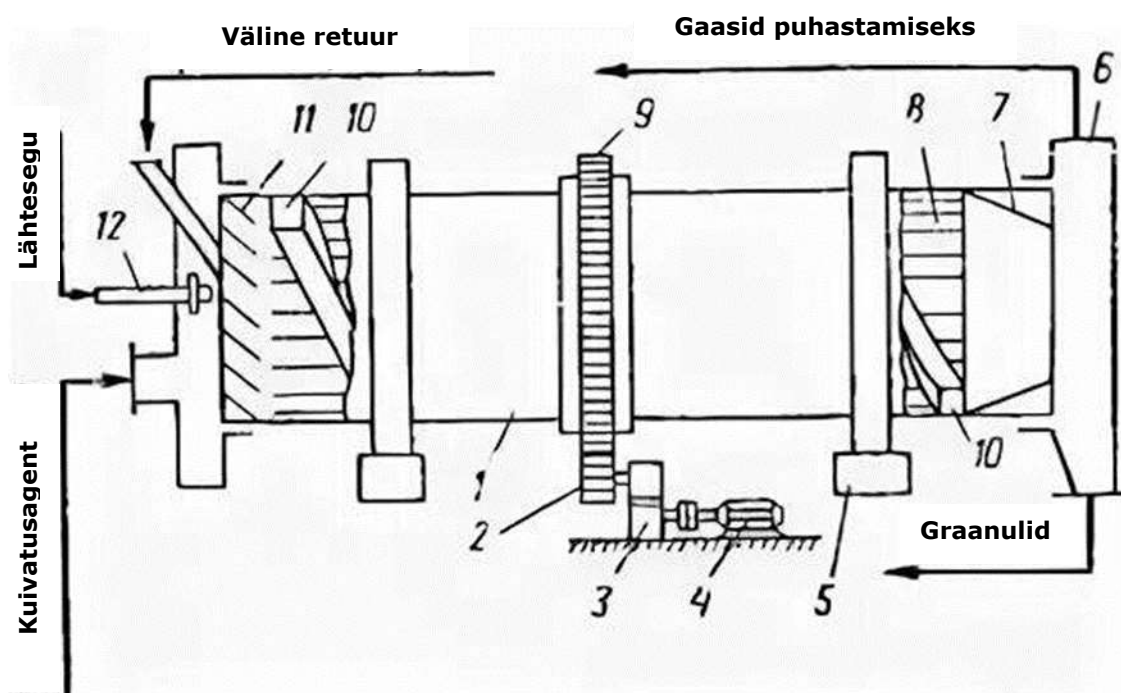
trumli täituvuse koefitsient  $\varphi = 0,13$ ;

Froude´i arv trumlile  $Fr = 0,25 \dots 0,035$ ;

sisereturi kordsus  $r_{sisereturi} = 10$ ;

tõstelabidate arv trumli ümbermõõtu mööda  $z = 16$ .

## Arvutused



Joonis 2.5 Trummelgranulaator-kuivati: 1 - trummel; 2 - hammasratas; 3 - reduktor; 4 - elektrimootor; 5 - tugijaam; 6 - mahalaadimiskamber; 7 - koonus; 8 - tõstelabad; 9 - ringhammasratas; 10 - tagasikäigu tigu; 11 - vastuvõtulabad; 12 - düüs [34]

Granulaatorkuivatis joon. 2.5 pihustatava segu kogus valemiga:

$$G_{segu} = \frac{G_{tootlikkus}}{1 - W_{segu}}, \quad (2.40) [34]$$

kus  $G_{tootlikkus}$  - valmistoote masstootlikkus, kg/h;

$W_{segu}$  - segu niiskus.

$$G_{segu} = \frac{1500}{1 - 0,15} = 1764,7 \approx 1764 \text{ kg/h.}$$

Aurustunud niiskuse kogus võrrandiga:

$$G_{niiskus} = G_{segu} W_{segu} - G_{tootlikkus} W_{tootlikkus}, \quad (2.41)$$

kus  $W_{tootlikkus}$  - valmistoote niiskus;

$$G_{niiskus} = 1756,5 \cdot 0,15 - 1500 \cdot 0,01 = 249,75 \text{ kg/h}$$

Õhukulu granulaatorkuivatis valemiga:

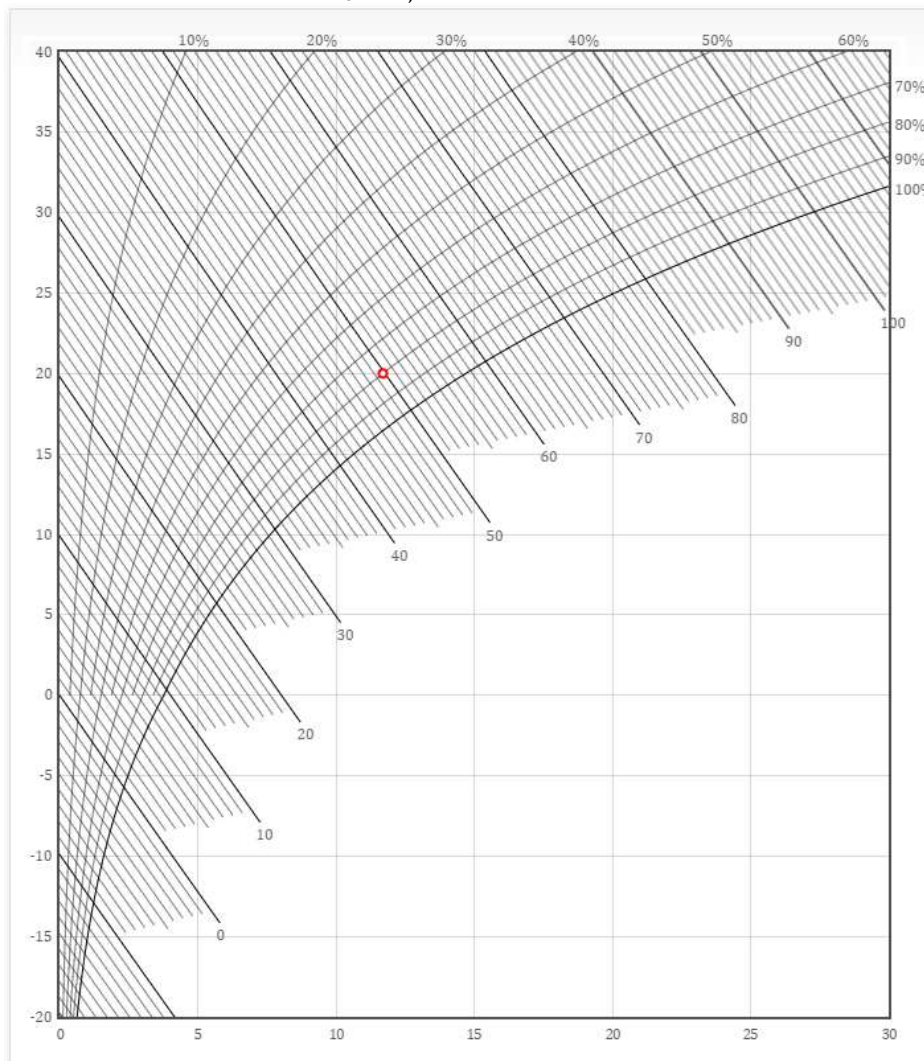
$$G_{\delta hk} = \frac{G_{niiskus}}{X_2 - X_1}, \quad (2.42) [34]$$

Kus  $X_1$ ,  $X_2$  – kuivatusagendi (õhu) niiskusesisaldus kuivatisse sisenemisel ja kuivatist väljumisel, g/kg;

$X_1 = 11,7$  g/kg keskvöötme suvetingimustele [42],

$X_2 = 207$  k/kg leiame I-X diagrammist (joonis 2.5) suhtelise niiskuse  $\varphi_2$  ja temperatuuri ( $t_{toote} = 100$  °C) järgi [42],

$$G_{\delta hk} = \frac{249,75 \cdot 1000}{207 - 11,7} = 1278,8 \text{ kg/h,}$$



Joonis 2.5 Niiske õhu I-X diagramm [42]

Kihi osakeste hõljumise kiirus  $W_h$  kitsendatud voolus võrrandist:

$$Re = \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}}, \quad (2.43) [34]$$

kus  $Re = \frac{w_h d_{toote}}{v_{\delta hk}}$  – Reynoldsi arv;

Ar – Archimedese arv;

$d_{toote}$  – toote graanulite keskmine diameeter, m;

$v_{\delta hk}$  – õhu kinemaatiline viskoossus,  $m^2/s$ ;

$$W_h = \frac{2,35 \cdot 10^5 \cdot 20 \cdot 10^{-6}}{0,002 (1400 + 5,22 \sqrt{2,35 \cdot 10^5})} = 0,63 \text{ m/s}$$

Soojuskandja töökiirus granulaatorkuivatis valemiga:

$$v_{soojuskandja} = 2,5 w_h \quad (2.44) [34]$$

$$v_{soojuskandja} = 2,5 \cdot 0,63 = 1,6 \text{ m/s}$$

Trumli diameeter valemiga:

$$D = \sqrt{\frac{4 G_{\delta hk} u}{\pi v_p \rho_{\delta hk}}} \quad (2.45) [34]$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 1278,8}{3,14 \cdot 1,6 \cdot 3600 \cdot 0,7}} = 0,635633 \approx 0,64 \text{ m,}$$

kus  $\rho_{\delta hk} = 0,7 \text{ kg/m}^3$  õhu tihedus töötemperatuuril;

$\varphi_2 = 25\%$  ja  $t = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Trumli lähim standardne diameeter  $D = 1,2 \text{ m}$ , kuna see on antud tootlikkuse jaoks vähim diameeter (kataloogi järgi trumli pikkusel 6 kuni 10 m) [43].

Soojuskandja temperatuuri granulaatorkuivatisse sisemisel määratakse võrrandiga:

$$G_{\delta hk} c_{\delta hk} (t_{sisse} - t_{toote} - 10) + \frac{G_{toote}}{1 - W_p} [c_{toote} (1 - W_p) + c_{niiskus} W_p] (\Delta t) \quad (2.46) [34]$$

$$+ G_{toote} q_{toote} = G_{niiskus} q_{niiskus};$$

$$1278,8 \cdot 1,02655 (t_{sisse} - 100 - 10) + \frac{1500}{1 - 0,15} [1,84 (1 - 0,15) + 4,19 \cdot 0,15] \cdot (100 - 20) + 1500 \cdot 17,02 = 249,75 \cdot 2493$$

millest  $t_{sisse} = 318,78907 \approx 319 \text{ }^\circ\text{C}$ ,

kus  $C_{toote}$  – õhu soojusmahtuvus,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;

$t_{toote}$  – toote kuivatamistemperatuur,  $^\circ\text{C}$ ;

$C_{niiskus}$  – niiskuse soojusmahtuvus,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;

$\Delta t$  – temperatuurivahe,  $^\circ\text{C}$ ;

$q_{toote}$  – toote lahustumissoojus  $\text{kJ}/\text{kg}$ ;  $q_{niiskus}$  – niiskuse soojussisaldus,  $\text{kJ}/\text{kg}$ .

Arvestades soojuskadu trumli isoleerimata seinte kaudu:  $t_{sisse} = 400 \text{ }^\circ\text{C}$

Arvestades õhuvõttu läbi ebatiheduste, on soojuskandja temperatuur pealeküttekollet:

$$t_{kütus} = 1,2 \cdot 480 \text{ °C.}$$

Kütuse kulu valemiga:

$$G_{kütus} = \frac{G_{õhk} c_{õhk} (t_{sise} - 20)}{q_{etalon}}, \quad (2.47) [34]$$

kus  $q_{etalon}$  – etalonkütuse põlemissoojus, kJ/kg;  $q_{etalon} = 29330 \text{ kJ/kg}$ .

$$G_{kütus} = \frac{1278,8 \cdot 1,02655 \cdot (400 - 20)}{29330} = 17 \text{ kg/h.}$$

Kuivatusala pikkus valemiga:

$$L_c = \frac{G_{tootlikkus} \cdot \tau}{0,785 D^2 \varphi \rho_{toote}}, \quad (2.48) [34]$$

kus  $\tau$  – kuivatamise aeg, h;

$\varphi$  – trumli täitmise koefitsient;

$\rho_{toote}$  – toote kihi tihedus, kg/m<sup>3</sup>.

$$L_c = \frac{1500 \cdot 0,5}{0,785 \cdot 1,2^2 \cdot 0,13 \cdot 966,22} = 5,28 \text{ m.}$$

Trumli pöörlemiskiirus valemiga:

$$\omega = \sqrt{\frac{2Fr \cdot g}{D}}, \quad (2.49) [34]$$

kus  $Fr$  – Froude'i arv;

$$\omega = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,035 \cdot 9,81}{1,2}} = 0,756472 \text{ s}^{-1},$$

$$n = \frac{60\omega}{2\pi} = \frac{60 \cdot 0,76}{2 \cdot 3,14} = 7,26115 \approx 7,26 \text{ pöret/min}$$

Labadega tõstetava materjali kulu valemiga:

$$G_l = 2,2 \cdot 10^{-3} D^2 L_{kuiv} z \omega \rho_{toote}, \quad (2.50) [34]$$

kus  $z$  – tõstelabade arv trumli ümbermõõdus.

$$G_l = 2,2 \cdot 10^{-3} \cdot 3600 \cdot 1,2^2 \cdot 7,3 \cdot 16 \cdot 0,76 \cdot 966,22 = 978183,05 = 9,78 \cdot 10^5 \text{ kg/h.}$$

## KOKKUVÕTE

Põlevkivituha ja reoveesette jäätmete koguste vähendamine on Eestile aktuaalne.

Tänapäeval on põlevkivituhk ohtlike jäätmete nimekirjast välja jäetud ning seda kasutatakse pinnase parendajana, kuid selles ei ole piisaval hulgal toiteaineid, selliseid nagu süsinik, lämmastik, fosfor jm. Samal ajal sisalduvad need toiteained reoveesettes. Teisest küljest võib töötlemata reoveesete olla inimesele kahjulik, kuna sisaldab patogeenseid viiruseid ja mikroorganisme.

Lõputöö eesmärk seisnes selles, et leida tehnoloogiline lahendus põlevkivituha ja reoveesette ühiseks kasutamiseks pinnase parendaja tootmises.

Käesolevas töös pakuti välja tuha ja reoveesette ühise utiliseerimise tehnoloogiline skeem. On tehtud reoveesette trummelkuivati arvutused. Reoveesette kuivatamisel saab neutraliseerida patogeenseid mikroorganisme ja viiruseid, helmintide mune, samuti vähendada sette mahtu ja teha see põlevkivituhaga segamise jaoks sobilikuks. On arvatud välja toorme etteandmise punktid, kolme teoga segisti sette ja tuha segamiseks vahekorras 20:3 ning trummelgranulaator-kuivati graanulite tootmiseks.

Pakutud seadet võiks juurutada mingis ettevõttes, kus tegeldakse kas siis reoveesetete töötlemisega või põlevkivi ümbertöötlemisega. Teine variant on eelistatavam, kuna põlevkivi ümbertöötlemise ettevõtetes on teisese soojuse üleküllus, mida võiks kasutada näiteks reoveesetete kuivatamiseks trummelgranulaator-kuivatis.

Lõputöö teemat võiks jätkata: tuha ja sette erineva vahekorra uurimiseks ja saadud segude toime uurimiseks erinevatele pinnastele ja kultuuridele.

## SUMMARY

In Estonia, over six million tons of shale ash are produced annually, of which more than 96% is placed in storage landfills (ash dumps) [1]. Shale ash has potential when used as a raw material in many industries. The main areas of application are: production of building materials, road construction, as well as agriculture and forestry.

About 150,000 m<sup>3</sup> of wet sewage sludge is generated annually in Estonia [2]. Of these, 72.3 percent is reused in agriculture as fertilizer and for the restoration of devastated lands, 12.4% for landscaping, and 8.3% is sent to landfills and 7% to disposal sites, a small part of the sludge is used for energy recovery by incineration [3].

The relevance of this thesis is to develop one of the possible solutions to the problem of joint utilization of sewage sludge and shale ash. Solving this problem is an important topic for research in Estonia, as it makes it possible to reduce the amount of industrial waste.

The author's task was to find a technological solution for the joint use of shale ash and sewage sludge to obtain a safe soil improver (soil conditioner).

In the first part of the graduation thesis, the characteristics and composition of shale ash formed in various industries, its main applications are given. The composition and properties of sewage sludges, methods of their treatment and applications are described. The author studied the work on the co-processing of sewage sludge with shale ash under laboratory conditions to obtain a granular soil improver. This work was carried out in 2021 by the National Institute of Chemical Physics and Biophysics (NICPB) commissioned by the KIK Environmental Investment Centre.

In the second part of the thesis, a scheme of a pilot plant for obtaining a granulated soil improver product is proposed. The technological equipment is calculated. Calculations of a drum dryer for drying sewage sludge have been made. This will eliminate pathogenic microorganisms and viruses, helminth eggs from the product, as well as reduce the volume of sludge and make it suitable for mixing with shale ash. In addition, feed bins and a three-screw mixer for mixing sludge with ash in a ratio of 20:3 and a drum granulator-dryer for the production of pellets are designed.

The proposed installation can be implemented at any enterprise engaged in both wastewater treatment and oil shale processing. The second option is preferable, since oil shale processing plants, as a rule, have an excess of secondary heat, which can be used, for example, for drying sewage sludge and in a drum granulator-dryer.

The topic of the graduation thesis may have the following continuation: the study of different ratios of ash and sludge to obtain a product suitable for various soils and crops, as well as the study of the effect of the mixtures obtained on various soils and crops.



## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. OSAMAT - PILOOTPROJEKT "PÕLEVKIVITUHA RAKENDAMISE VÕIMALUSTE UURIMISEKS TEE-EHITUSES." OSAMAT projekt LIFE+ 09/ENV/000227. Projekti kestus - 2010-2016 aa. [Online] <https://www.osamat.ee/ru/2014-01-08-10-23-21/keskkond.html>(10.04.2023). (veebiartikkel)
2. Reoveesette käitlemine - peamised proleemid ja võimalikud lahendused. 2017. [Online] <https://envir.ee/media/797/download> (10.04.2023). (veebiartikkel)
3. Põlevkivituhkade ohtlikkuse uuring [Online] <https://envir.ee/media/4080/download> (10.04.2023). (veebiartikkel)
4. Kallaste P. Põlevkivi mineraalsete jäätmete leostus tasakaalud mudelsüsteemides. Magistritöö. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool 2015.[Online] <https://digikogu.taltech.ee/en/Download/4ed32223-d39b-4710-89fc-539ab1987392>(10.04.2023). (veebiartikkel)
5. Сланцевая зола – отходы или сырьё? [Online][https://www.betoon.org/wp-content/uploads/2019/08/Stroitel\\_okt-2018\\_s18-20.pdf](https://www.betoon.org/wp-content/uploads/2019/08/Stroitel_okt-2018_s18-20.pdf)(10.04.2023). (artikkel e-ajakirjast)
6. Kiiretoimeline meliorantmullaparendaja, 2023 Eesti Energia AS. [Online] [https://www.energia.ee/-/doc/10187/eestienergiast/enefix/enefix\\_mullaparendaja\\_infoleht.pdf](https://www.energia.ee/-/doc/10187/eestienergiast/enefix/enefix_mullaparendaja_infoleht.pdf) (13.04.2023). (veebi infoleht)
7. Dijeva, A. Põlevkivituha kasutamisest ammendatud freesturbaväljade taasmetsastamisel, 2016 [Online] <https://dspace.emu.ee/xmlui/handle/10492/2574> (10.04.2023). (veebilehekülg)
8. Mis on põlevkivituhast saadav kaltsiumkarbonaat. [Online] <https://clck.ru/34A2a3> (15.04.2023). (veebiartikkel)
9. Aruanne: Põlevkivituhkade ohtlikkuse uuring. Tallinn, 2019. [Online] <https://envir.ee/media/4080/download> (15.04.2023). (veebiartikkel)
10. Хисамеева, Л.Р., Селюгин, А.С., Абитов, Р.Н., Бусарев, А.В., Урмитова, Н.С. Обработка осадков городских сточных вод. Казань, 2016. [Online] <https://www.kgasu.ru/upload/iblock/efc/obrabotka-osadkov-gorodskikh-stochnykh-vod.pdf> (18.04.2023). (e-õppematerjal)
11. Euroopa parlamendi ja nõukogu direktiiv 2008/98/EÜ [Online] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/?uri=CELEX%3A32008L0098> (18.04.2023). (veebilehekülg)
12. Lend, M. Vee tarbimine Eestis on kasvanud. 12.10.2022. [Online] <https://keskkonnaagentuur.ee/uudised/vee-tarbimine-eestis-kasvanud> (10.04.2023). (veebiartikkel)

13. MAGISTRITÖÖ teemal: Reoveesettes oleva vabavee sisalduse määramine termogravimeetrilise meetodiga. Tallina Tehhnikaülikool: Tartu, 2019. [Online] <https://digikogu.taltech.ee/et/Download/4c8ba094-01a5-4f77-a5c6-d632b104d40e> (18.04.2023). (veebiartikkel)
14. Campus ULille Sciences and Technologies, University of Lille, Lille, France. Sanitary and environmental aspects of sewage sludge management. National Library of Medicine, 2019. [Online] <https://inlnk.ru/PmARB0> (18.04.2023). (veebiartikkel)
15. Uuring Biolagunevatest jäätmetest ja/või reoveesetest saadud materjalide kasutamise võimalused haljastustöid hõlmavates riigihangetes ja karjääride korrastamisel. Tartu, 2019. [Online] <https://envir.ee/media/5287/download> (20.04.2023). (veebiartikkel)
16. Reoveesette kääritatud jäägi ja põlevkivituha ringlussevõtt. Tulemuste aruanne. Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut, 2021. [Online] [https://kbfi.ee/wp-content/uploads/2021/01/KIK-aruanne-Reoveesete\\_2020\\_KBFI.pdf](https://kbfi.ee/wp-content/uploads/2021/01/KIK-aruanne-Reoveesete_2020_KBFI.pdf) (20.04.2023). (veebiartikkel)
17. Крупичин, Е. Мезофильное анаэробное сбраживание. [Online] <https://www.c-o-k.ru/articles/mezofil-noe-anaerobnoe-sbrazhivanie> (22.04.2023). (artikkel e-ajakirjast)
18. Данилович, Д. А., Ванюшина А.Я. Анаэробное сбраживание ключевая технология обработки осадков городских сточных вод. [Online] <https://inlnk.ru/57MN6D> (20.04.2023). (veebiartikkel)
19. Agricultural use of sewage sludge. [Online] <https://www.fao.org/3/t0551e/t0551e08.htm> (22.04.2023). (veebiartikkel)
20. Обеззараживание осадков сточных вод. [Online] <http://engineeringsystems.ru/o/obezzorajivanie-osadkov-stochnih-vod.php> (22.04.2023). (veebiartikkel)
21. Rorat, A., Courtois, P., Vandenbulcke, F., Lemiere S. Sanitary and environmental aspects of sewage sludge management. 2019. [Online] <https://inlnk.ru/meLoQV> (22.04.2023). (veebiartikkel)
22. Давыдов, А.С., Воробьева Р.П. Статья Почвенная утилизация осадков сточных вод – экологически безопасный способ повышения плодородия и охраны земель. [Online] <https://cyberleninka.ru/article/n/pochvennaya-utilizatsiya-osadkov-stochnyh-vod-ekologicheski-bezopasnyy-sposob-povysheniya-plodorodiya-i-ohrany-zemel/viewer> (22.04.2023). (veebiartikkel)
23. Zapałowska, A., Puchalski, Cz., Stankowski, S., Gibczyńska, M. "Fertilisation with ash from wood and with sewage sludge versus." [Online] <https://cyberleninka.ru/article/n/pochvennaya-utilizatsiya-osadkov-stochnyh->

- [vod-ekologicheski-bezopasnyy-sposob-povysheniya-plodorodiya-i-ohrany-zemel/viewer](#) (20.04.2023). (veebiartikkel)
24. Magistritöö teemal: Töödeldud reoveesette kasutamine ja perspektiivid Eesti maastikuehituse valdkondades. Tallinna Tehnikaülikool: Tartu, 2016. [Online] <https://digikogu.taltech.ee/et/Download/40271aee-bc88-485a-a176-7bd77f560c87> (18.04.2023). (veebiartikkel)
25. Regionaalsete reoveesette käitlemise lahenduste väljatöötamine ja jäätmete lakkamise kriteeriumite väljatöötamine reoveesette kohta. III osa aruanne, Tartu, 2015. [Online] <https://digikogu.taltech.ee/et/Download/40271aee-bc88-485a-a176-7bd77f560c87>
26. Ojala, P. Saasteaineid sisaldava reoveesette kompostimine kontrollitud tingimustes, kasutades kahes proportsioonis saepuru. Tallinna Tehnikaülikooli Tartu Kolledž: Tartu, 2016. [Online] <https://digikogu.taltech.ee/et/Download/d293d67d-00fb-4e62-b3b7-3c3bc08dee13> (18.04.2023). (veebiartikkel)
27. Брындина, Л.В., Шеламова С.А. Способ получения компоста на основе осадка сточных вод. 2019. [Online] <https://patentimages.storage.googleapis.com/29/15/01/cbb45d3f9d88e2/RU2683226C1.pdf> (18.04.2023). (veebiartikkel)
28. Tao, J., Wu, S., Sun, L., Tan, X., Yu, S., Zhang, Z. Composition of Waste Sludge from Municipal Wastewater Treatment Plant. 2012. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878029612003738> (22.04.23). (veebiartikkel)
29. OÜ Järve Biopuhastus stabiliseeritud reoveesette (komposti) analüüsitulemused 2022 [Online] <https://inlnk.ru/3ZM3aZ>
30. Новикова, О.К. Обработка осадков сточных вод Учебно-методическое пособие. Гомель, 2015 [Online] [http://elib.bsut.by/bitstream/handle/123456789/653/novikova\\_obrabotka\\_osadkov\\_stoch\\_vod.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://elib.bsut.by/bitstream/handle/123456789/653/novikova_obrabotka_osadkov_stoch_vod.pdf?sequence=1&isAllowed=y) (22.04.23). (e-raamat)
31. © Copyrights 2007—2017, ПрогрессУралИнжиниринг [Online] [http://progressural.com/catalog/402/\\_aview\\_b8](http://progressural.com/catalog/402/_aview_b8) (22.04.20). (veebilehekülg)
32. Jürs, E., toimetaja Reinsalu, E. Eesti põlevkivi töötlemine. Mäeinsineeride õppematerjal. Täiendatud ja parandatud 2019, Kiviõli – Tallinn. [Online] <https://digikogu.taltech.ee/et/Download/88a2bc60-f1a3-4e7b-bfcd-c9b2d2f1110f> (18.04.2023). (veebiartikkel)
33. © Vkg.ee [Online] <https://www.vkg.ee/polevkivikutteoli/#modal1> (18.04.2023). (veebilehekülg)

34. Ветошкин, А.Г. Технические средства инженерной экологии. Учебное пособие: изд. «Лань», 2018, lk. 381-388. (raamat)
35. Мясоеденков, В.М. Расчет барабанной сушильной установки. Учебно-методическое пособие: Москва, 2000. [Online] <https://studfile.net/download.php?id=6393132&code=880fdc8b04604dcfed010f1172c37b73&download-status=process0001> (18.04.2023). (veebilehekülg)
36. Старшов, Г.И., Никоноров С.Н., Никитин, А.И. Основы проектирования и расчет технологического оборудования пищевых предприятий. Учебное пособие к практическим занятиям: Саратов, 2008. [Online] <https://cv01.studmed.ru/download/328a273c905/ef6755b/pdf/ef6755b> (18.04.2023). (veebilehekülg)
37. © Alve.ee [Online] <https://alve.ee/ru/toode/bio-kompost-10/> (18.04.2023). (veebilehekülg)
38. Koroljova, A., Talviste, P. Põlevkivi lendtuha taaskasutamine hüdraulilise sideainena pehmete pinnaste tugevdamisel. Tallinn, 2018. [Online] [https://www.energia.ee/-/doc/8457332/ettevottest/pdf/uuringu\\_tulemused\\_4.pdf](https://www.energia.ee/-/doc/8457332/ettevottest/pdf/uuringu_tulemused_4.pdf) (19.04.2023). (veebilehekülg)
39. © Ogrant.ck.ua [Online] <https://ogrant.ck.ua/ua/p906568262-spiral-shneka-diametrom.html> (18.04.2023). (veebilehekülg)
40. Виды, состав и свойства осадков городских сточных вод. [Online] <https://vodalos.ru/spravochniki-stroitelya/spravochnik-proektirovshika/10/1> (18.04.2023). (veebilehekülg)
41. Справочник химика 21. [Online] <https://chem21.info/page/002148226041056173188047072247049050199033044232/> (25.04.2023). (veebilehekülg)
42. © AboutDC.ru. [Online] <https://aboutdc.ru/page/1716.php?tmin=20&tmax=40&dmin=0&dmax=30&t1=100&fi1=25#calculator> (25.04.2023). (veebilehekülg)
43. © Copyright 1998-2023 [Online] <https://sinoder.en.made-in-china.com/product/SvNQickJgzRp/China-Rotary-Drum-Granulator-Bean-Dregs-Dryer-Fluorite-Powder-Dryer.html>
44. Энциклопедия по машиностроению XXL [Online] <https://mash-xxl.info/page/235148236196141247168056252087193020054123243243/>
45. Зайнуллин, Р.Р., Галяутдинов, А.А. Применение технологии пиролиза в утилизации осадков сточных вод. Казань, 2016. [Online] <https://bit.ly/3LU0cxQ> (30.04.2023). (artikkel e-ajakirjast)

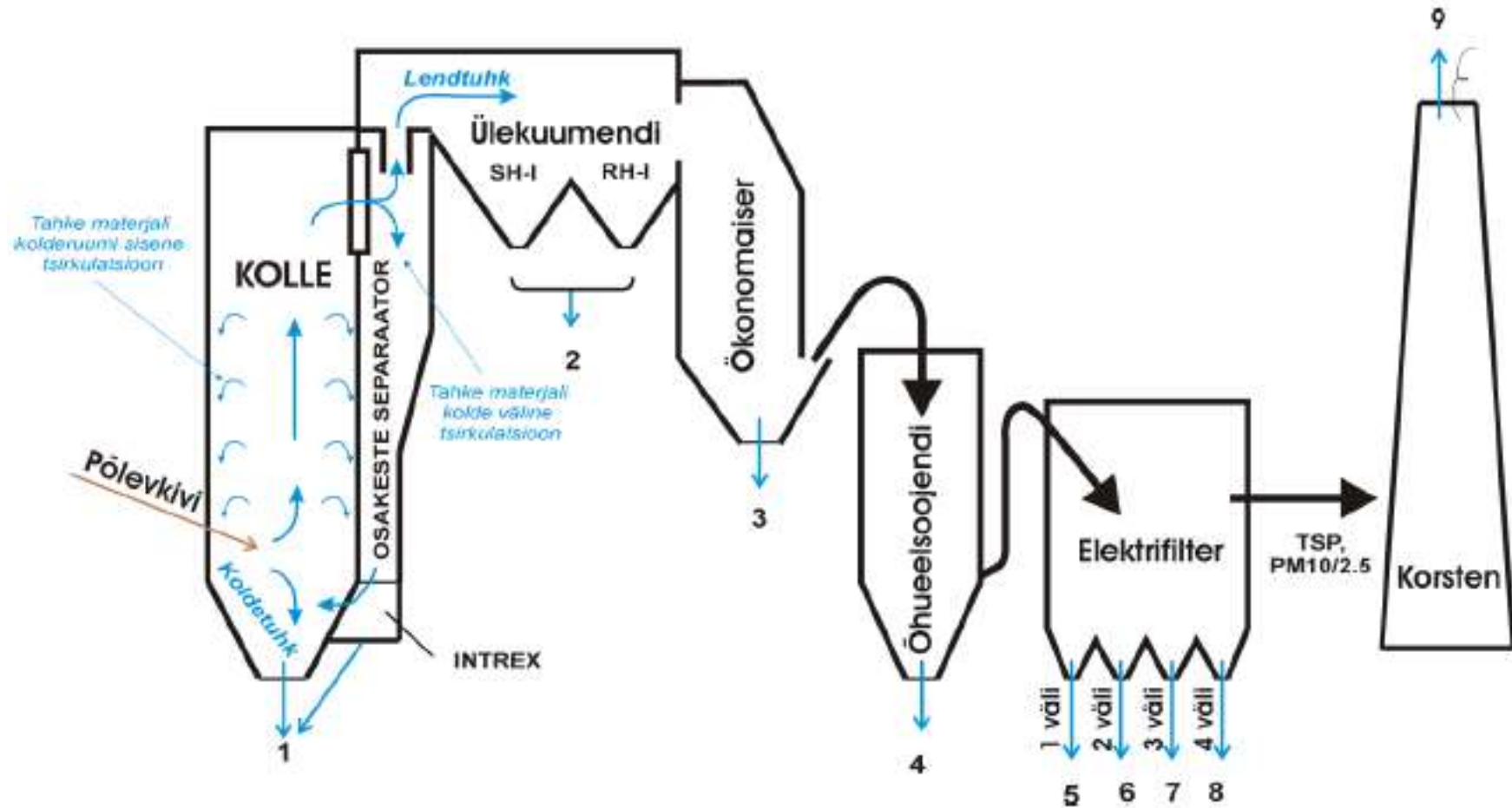
## Lisa 1. OÜ Järve Biopuhastus stabiliseeritud reoveesete analüüsitulemused 2022

Näitaja	Tulemus	Ühik
Kuivaine	59,1	%
Orgaanilise aine sisaldus	69,2	%
pH	7,9	
Üldfosfor	23000	mg/kg KA
Kaalium	7560	mg/kg KA
Üldlämmastik	45000	mg/kg KA
Umbrohuseemned	0	1/l
Võõrised	0	%
Maksimaalne osiste suurus	10	mm
Plii (Pb)	14	mg/kg KA
Kadmium (Cd)	1,1	mg/kg KA
Kroom (Cr)	68	mg/kg KA
Vask (Cu)	99	mg/kg KA
Nikkel (Ni)	54	mg/kg KA
Elavhõbe (Hg)	0,77	mg/kg KA
Tsink (Zn)	297	mg/kg KA
Väävel (S)	1200	mg/kg KA
Salmonellabakter	Ei leidu	
Hapnikutarve	4,2	Mg O <sub>2</sub> /g DW
Biogaasi jääkpotentsiaal	≤ 10	l/g OA
Escherichia coli	132	MPN/1g
Helmintide munad	0	Muna/10g

Kirjanduse allikas: [29]

## Lisa 2. Põlevkivi proovivõtu kohtade skeem

Põlevkivi proovivõtu kohtade skeem Eesti Elektriijaama katlal CFBC: koldetuuk – KT (1), ülekuumendi – ÜK (2), ökonomaiser – ÖKO (3), õhuelsoojendi – ÕES (4), elektrifiltri 1. väli – EF1 (5), elektrifiltri 2. väli – EF2 (6), elektrifiltri 3. väli – EF3 (7), elektrifiltri 4. väli – EF4 (8), heittuuk atmosfääri (9) [9].



### Lisa 3. $A_B$ ja $\psi$ koefitsientide väärtused

Materjal	Materjali näidis	Koefitsientide väärtused	
		$\psi$	$A_B$
Kerge ja mitteabrsiivne	Teravili, jahu	0,4	65
Kerge väheabrsiivne	Kriit, kliid, sooda jt	0,32	50
Raske ja väheabrsiivne	Sool, suhkur, liiv, kuiv savi jt	0,25	45

Kirjanduse allikas: [36]