

TTÜ Energiatehnoloogia instituut

**KOOREJÄÄTMETE AUNASTAMISE JA
KUIVATAMISE ANALÜÜS VARA SAEVESKI OÜ
NÄITEL**

**ANALYSIS OF STORAGE AND DRYING OF BARK BASED
ON AN EXAMPLE OF VARA SAWMILL OÜ**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Grete Glaase

Üliõpilaskood: 179703EACB

Juhendaja: Oliver Järvik, vanemteadur

Tallinn 2020

(Tiitellehe pöördel)

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.

"2" juuni 2020

Autor: G. Glaase *(allkirjastatud digitaalselt)*

Töö vastab bakalaureusetöö esitatud nõuetele.

"2" juuni 2020

Juhendaja: O. Järvik *(allkirjastatud digitaalselt)*.

Kaitsmisele lubatud

"....."201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Grete Glaase, (sünnikuupäev: 30.07.1998)

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

Koorejätmete aunastamise ja kuivatamise analüüs Vara Saeveski OÜ näitel,

mille juhendaja on

Oliver Järvik,

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.

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

(allkirjastatud digitaalselt)

02.06.2020

TalTech Energiatehnoloogia Instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Grete Glaase, 179703

Õppekava, peeriala: Keskkonna-, energia- ja keemiatehnoloogia, energiatehnoloogia

Juhendaja(d): Oliver Järvik, vanemteadur, 6203909

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Koorejäätmete aunastamise ja kuivatamise analüüs Vara Saeveski OÜ näitel

(inglise keeles) Analysis of storage and drying of bark based on an example of Vara Sawmill OÜ

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Analüüsida aunastatud kütust
2. Hinnata trummelkuivati kuivatamise potentsiaali
3. Võrrelda aunastamist ja kuivatamist

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Eesmärkide seadmine	10.01.
2.	Eksperimentaalse osa kavandamine	06.02.
3.	Kirjanduse ülevaate koostamine	30.03.
4.	Mõõtmiste teostamine	20.04.
5.	Andmete töötlus ja analüüs	25.05.
6.	Lõputöö vormistamine	02.06.

Töö keel: eesti **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "2" juuni 2020 a

Üliõpilane: G. Glaase *(allkirjastatud digitaalselt)* "2" juuni 2020 a
/allkiri/

Juhendaja: O. Järvik *(allkirjastatud digitaalselt)* "2" juuni 2020 a
/allkiri/

Programmijuht: O. Järvik *(allkirjastatud digitaalselt)* "2" juuni 2020 a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	6
Lühendite ja tähiste loetelu	7
SISSEJUHATUS	8
1. Tahked biokütused	9
1.1 Raie ja transport	10
1.2 Hoiustamine	10
1.3 Purustamine	11
1.4 Kuivatamine	12
1.4.1 Trummelkuivati	13
1.4.2 Kuivamise kineetika	14
1.5 Aunastamine	16
1.5.1 Asukoht	18
1.5.2 Kuivaine kadu ja niiskus	18
1.5.3 Isesüttimine	20
1.5.4 Muud mõjud	20
2. Eksperimentaalne osa	22
2.1 Vara Saeveski	22
2.2 Proovivõtt	23
2.3 Biokütuse kvaliteedi hindamine	24
2.3.1 Niiskus	26
2.3.2 Kütteväärtus	27
2.3.3 Tuhk	29
2.3.4 Kvaliteedinäitajate määramine	29
3. Tulemuste analüüs	33
3.1 Ilm	33
3.2 Veebruari aun	37
3.3 Niiskus	38
3.4 Sõelanalüüs	39
3.5 Tuhk	40
3.6 Kütteväärtus	40
3.7 Kuivati arvutus	43
KOKKUVÕTE	46
CONCLUSION	48
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	50

EESSÕNA

Lõputöö teema algatasid Enar Kraav (Energex Energy Experts OÜ) ja Leo Karafin (Vara Saeveski OÜ esindaja), et analüüsida Vara Saeveski OÜ puukoorte kuivamist aunastamisel ja selle mõju kütusele. Lõputöö jaoks vajalikud andmed ja proovid saadi Vara Saeveski OÜ puukoore aunadest, mille asukoht on Vara küla, Peipsiääre vald, Tartu maakond. Proovide analüüsid teostati Tallinna Tehnikaülikooli Energiatehnoloogia Instituudi laboris.

Lõputöö autor soovib tänada abi eest oma lõputöö juhendajat Oliver Järvikut ja lõputöö teema algatajat Enar Kraavi. Proovide võtu ja kohale toimetamise eest soovib autor tänada veel Vara Saeveski poolset kontaktisikut Leo Karafini. Analüüside teostamise võimaluse eest soovib autor tänada TalTech'i Energiatehnoloogia Instituuti ja selle laborit.

Võtmesõnad: Biomass, kuusekoor, aunastamine, kuivatamine, kuivati, bakalaureusetöö

Lühendite ja tähiste loetelu

%db – niiskuse ühik, 1 kg vett 1 kg kuiva materjali kohta

%wb – niiskuse ühik, 1 kg vett 1 kg niiske materjali kohta

A – tuhasisaldus 1 kg kuiva materjali kohta, %

pm^3 – puistekuupmeeter, 1 m^3 vabalt sisalduvat puitkütust

$Q_{k,a}$ – kuivaine alumine kütteväärtus, MJ/kg

$Q_{k,ü}$ – kuivaine ülemine kütteväärtus, MJ/kg

$Q_{t,a}$ – tarbimisaine alumine kütteväärtus, MJ/kg

t_m – tihumeeter, 1 m^3 ilma õhuvahedeta puitmassi

W – üldniiskus, vee hulk 1 kg materjalis

w_a – analüütiline niiskus, vee hulk 1 kg materjalis peale kuivatamist ja toatingimustes jahtumist

SISSEJUHATUS

Tahkete biokütuste tähtsus tänapäeva energeetikas kasvab iga aastaga. Üha enam otsitakse tööstuses lahendust tootmisjäakide võimalikult efektiivseks kasutamiseks.

Teema on aktuaalne ka Vara Saeveskis, kus tootmisprotsessis tekib aastas keskmiselt 36000 pm³ (puistkuupmeeter, väljendab 1 m³ suuruses mahus vabalt sisalduvat puitkütust) puukoore jäätmeid ja lisaks 6000 pm³ koore- ja oksajäätmeid. Esialgsete proovide kohaselt on värskes puukoores niiskus 70% ringis. Kütust hoiustatakse õues piklikes hunnikutes, mida nimetatakse aunadeks.

Õues hoiustamisega kaasnevad eriti suveajal probleemid, kuna puitmaterjalile tekib seenekahjustus, mis vähendab saematerjali toodangu kvaliteeti ning puukoore kütuse kvaliteeti. Seente kasvu pärssimiseks kastetakse palke, mille töötlemisel saelaudadeks tekib kõrvalsaadusena koorekütus. Kastmise tõttu on kütusel kõrge niiskussisaldust. Vastukaaluks toimub aunastamisel kütuse soojenemine, mis kuivatab auna seestpoolt. Vara Saeveskis aunastakse puukoori varasemate kogemuste põhjal, mis on näidanud, et materjali kuivatamiseks piisab, kui hoida puukoori aunas kolm kuud. Varasemate kütuseproovide kohaselt on selle aja jooksul aunas olnud kütuse niiskus alanenud kuni 35%-ni, kuid ainult auna keskel. Kütuse transportimisel katlamaja kütuselattu kopplaaduriga toimub äärekihtide ja keskmise osa segunemine. Selle segu niiskust ei ole mõõdetud. Seenekahjustuse ja isesüttimise vältimiseks on võimalik kütust kuivatada enne katelasse suunamist või aunastada puukoori väiksemas mahus.

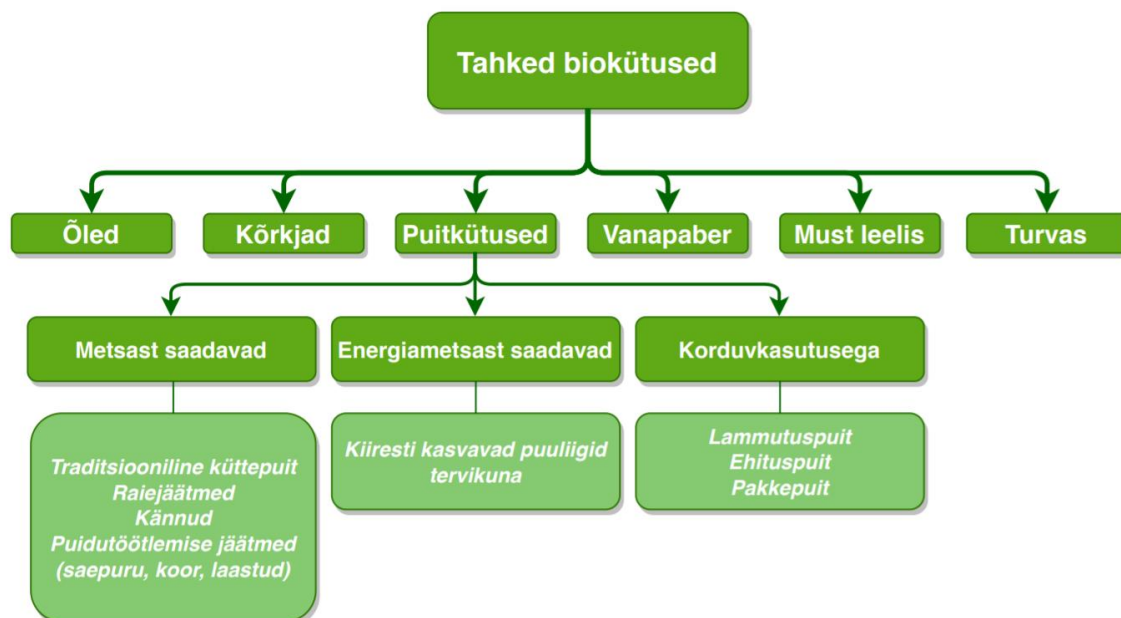
Vara Saeveski rajas 2019. aasta lõpul uue 6 MW biokatlamaja, mis on võimeline põletama kütust niiskusega 35-65%, spetsiifiliselt eesmärgiga põletada just tootmises tekkivat niisket puukoore jäädet, et toota saematerjali kuivatamiseks odavat soojust.

Bakalaureusetöö eesmärgiks on teoreetilises osas uurida ja kirjeldada aunas toimuvaid protsesse ja materjali kuivatamise alternatiive. Praktilise osa väljundiks on uurida kahes eri kuusekooreaunas oleva kütuse kvaliteeti. Antud töös antakse lühiülevaade kuivatamisest, aunastamisest ja katsemetoodikast, mida kasutati kütuse kvaliteedi hindamiseks.

Lõputöö üldisemaks väljundiks on katselise osa põhjal leitakse puukoorte niiskuse, kütteväärtuse ja tuhasuse muutused aunas kuivamise tagajärjel. Nende baasil hinnatakse kuivati kuivatamise potentsiaali, kui soojusallikaks on suitsugaaside kondensaator, ning võrrelda seda aunas kuivatamisega.

1. Tahked biokütused

Biomass on üldnimetus materjalile, mis on otseselt või kaudselt tekkinud fotosünteesi tulemusena. Biomass on nii taimne mass kui ka muu sarnase päritoluga materjal – puit, õled, põllumajanduse ja ka loomakasvatuse kõrvalproduktid. Tahke biokütus on biomassis keemilise energiana salvestatud päikeseenergia kasutamine energeetilisel eesmärgil. Kui biokütuse tootmine on jätkusuutlik, siis võib seda lugeda taastuvenergiaks. Biomassi kütusena kasutamise põhjused võivad olla nii poliitilised (energeetilise sõltumatus saavutamine), majanduslikud (töökohtade tekitamine) kui ka keskkonnasäästlikkus. [1]



Joonis 1.1 Biokütuste jaotus [2], [3]

Tahkeid biokütuseid võib toota erinevatest looduslikku päritolu toorainetest, nagu kujutatud joonisel 1.1. Selles bakalaureuse töös käsitletakse puidutööstuse jäätmeid, täpsemalt okaspuude koort.

Biokütused on Eestis laialt rakendatavad kütused. 2018. aastal toodeti elektrienergiast 9,7% ja soojusenergiast 53,2% biomassist kütuste baasil. Elektrienergiat toodeti 2018. aastal puiduhakke ja -jäätmete baasil 1,2 TWh ja soojusenergiat 2,5 TWh. Selleks tarbiti elektri jaamade poolt üle 1900 tuhande tm (tihumeeter, 1 m³ ilma õhuvahedeta puitmassi ruumala) puitkütust. [4]

1.1 Raie ja transport

Iga puitkütuse teekond saab alguse metsast, kus teostatakse raie. Raiel lõigatakse spetsiaalsete masinatega puud maha ning enamasti eemaldatakse puudelt ka oksad. Üldiselt pannakse palgid ja raiejäätmed eraldi hunnikutesse ning ka transporditakse eraldi. Peale tüvematerjali ja okste võiks kasutada kütusena ka kände ja juuri, kuid tihti sellest loobutakse nende kättesaamise energiakulukuse tõttu. Tüvepuidu laia kasutusala ja roheline energia tähtsuse tõusu tõttu on vaja leida üha enam viise, kuidas toota energiat ressursisäästlikult. [3]

Palgid transporditakse saeveskisse töötlemiseks. Koorekütuse saamiseks läbivad palgid masina, mis nad koorib. Teatud hulk kasutatavaid jäätmeid tekib ka sorteerimis- ja pööramisliinil.

Toores biomass on kõrge niiskusesisaldusega (30-60%) ja suure mahuga [5]. Kütuse paremaks transportimiseks ja hoiustamiseks on töötatud välja mitmeid eri meetodeid.

1.2 Hoiustamine

Kui jääb arvestatav ajavahemik tootmise ja kasutamise vahele, on vajalik kütuse hoiustamine. Hoiustamine peaks toimuma tootmisjaama lähedal, et tagada tõrkevaba protsess. [1] Kütuse hoiustamine mängib olulist rolli eriti põhjapoolsetes riikides, kuna talveperioodil on küttevajadus suurim, aga materjali kättesaamine on raskendatud ning selle niiskussisaldus on suur. Suveperioodil on jälle kütuse kättesaamine lihtsam, kuid soojuse tarbimine pole nii suur. Katlamajas peaks olema ka piisav puhverkogus kütust, et töö poleks võimalike tarneprobleemide tõttu häiritud. [5]

Biokütuseid iseloomustab suhteliselt madal energiatihedus ja seetõttu ei tohiks kütuseladu tõsta oluliselt kütuse hinda [1]. Hoiustamise lihtsaim lahendus on kuhjata kütus hunnikusse. Hunnikud võib ladustada nii õues, katte all, katuse all või üldse siseruumides. Levinumad variandid on kattega või katteta hunnikud õues. Hunnikute tegemiseks kasutatakse kopplaadureid.

Hunnikute puhul esinevaks probleemiks on sisemuses toimuv bioloogiline ja vahel ka keemiline lagunemine, mille tulemustena tekib soojus ja võib toimuda isesüttimine. Isesüttimise võimalikkus oleneb veel paljudest muudest teguritest – osakeste suurusest, materjali omadustest, niiskussisaldusest, kuhja mõõtmetest ja ventilatsiooni

olemasolust. Laguprotsessides tekkiva soojuse toimel toimub ka materjali kuivamine, kuid samuti tekib kuivaine kaudu, mille tagajärjel kütuse parameetrite muutus. [1]

Puitkütuse kuhjamisest aunadesse ehk piklikesse virnadesse või hunnikutesse nimetatakse aunastamiseks. Aunas toimuvatest protsessidest on detailsemalt juttu peatükis 1.5 aunastamine. Aunad võivad olla nii katteta või ilma.

Kütuse probleemivabamaks hoiustamiseks võib seda ka kuivatada ja kokku pressida (pallid, pelletid, briketid jms). Juba kuiva kütust (alla 30%wb (1 kg vett 1 kg niiske materjali kohta)) pole otstarbekas hoiustada õues ilma katteta. Kütust võib peale kuivati kuivatada ka kütusehoidlas, mida on täiendatud ventilatsiooni- või põrandaküttesüsteemiga. Kuivatamise eesmärgiks on niiskussisalduse vähendamine, et pärssida laguprotsesside kiirust. [1]

1.3 Purustamine

Raiejäätmete purustamine on oluline ebahomogeensuse vältimiseks kütuses. Heterogeenne kütus võib tekitada probleeme hoiustamisel ning pärsib katla efektiivsust. Raiejäätmed võib hakkida nii raielangul, vahelaos või lõpplaos. Levinum meetod põhjamaades on hakkimine vahelaos, sest langul hakkimine nõuab kalleid ja suuri masinaid, mida tihti Eesti metsade pehme pinnas kanda ei suuda. Langul hakkides on tuleb arvestada ka kütuse suurema niiskussisaldusega, kuna värske puit ei jõua veel kuivama hakata. [3]

Hakkpuidu tootmiseks kasutatakse laias laastus kolme tüüpi hakkureid – ketashakkureid, trummelhakkureid ja tiguhakkureid. Lisanditega puidu jaoks kasutatakse veel muid seadmeid, näiteks hammerveskeid, rullpurusteid, lõugpurusteid ja teisi. [3]

Purustatud puulaastud on üldiselt suurusega 3-300 mm ning need jaotatakse kvaliteedi ja lisandite järgi rohelisteks, pruunideks ja valgeteks.

- Rohelised puidulaastud tulevad metsaraielt. Nendes on märkimisväärsel hulgal oksaraage, lehti või okkaid. Veesisaldus on suur, kuna tegemist on toore materjaliga.
- Pruunid puidulaastud tekivad tüve jääkidest ja sisaldavad puukoort.
- Valged puidulaastud tekivad tüve jääkidest, aga ei sisalda kooretükke. Neid kasutakse puitlaastplaatide tootmiseks. [6]

Puidulaastude keskmine tihedus on 300 kg/m^3 . Materjali tarbimisaine alumine kütteväärtus võib jääda sõltuvalt niiskussisaldusest vahemikku 5,9 - 15,1 MJ/kg. Niiskussisaldus võib jääda vahemikku 63 kuni 38 %wb [3], kuid on puidulaastude puhul on enamasti aastaringselt 50-55 %wb. [6]

1.4 Kuivatamine

Üheks laialt levinud biomassi töötlemise viisiks on kuivatamine. Biomassi kuivatamine enne hoiustamist ja kasutamist on soositud, sest niiskussisalduse langemisel on hoiustamisel vähem bioloogilisi probleeme, kasvab kütteväärtus, katlas suureneb põletamise efektiivsus, väheneb suitsugaaside maht ja peenosakeste kontsentratsioon, kuid sellega kaasneb ka suurem energia- ja kapitalikulu. Kuivatamine võib toimuda nii ventileeritavas laos kui ka spetsiaalses kuivatis. [1], [7]

Kuivati või ventileerimissüsteemi planeerimisel tuleb arvestada veel mitmete mõjutavate teguritega nagu kütuse hind, jaama suurus, põletamise ja soojustagastuse tehnoloogiad. Kuivatamine on üldiselt majanduslikult kasulik vaid lihtsalt kättesaadava ja odava energia olemasolul, näiteks päikesepaneelid, suitsugaasid või nende kondensaator, katel jt. [1] Kuivati võib olla eraldiseisev seade või soojusjaama osa, kus kasutakse toodetud soojust (kaugküttevõrk, koostootmisjaam) või jääksoojust (katlamaja suitsugaasid) allikana [8]. Igal juhul tuleb enne kuivatusüsteemi investeerimist teha põhjalik majanduslik analüüs selle tasuvuse kohta.

Kuivateid on eri tööpõhimõtetega: lintkuivati, trummelkuivati, torukimp-kuivati, ülekuumendatud auruga kuivati jt. Hakkpuidu kuivatamiseks on eelistatud lint-, trummel-, keevkiht-, pneumo- ja torukuivati, sest kütus on pidevas liikumises ning puudub soojuse akumulatsioon, mis võib viia kütuse süttimiseni. Puidukoore puhul on eelistatud trummelkuivati ja pneumokuivati.[8] Trummelkuivatil on madalam efektiivsus ja suurem kuivatusgaasi vajadus kui pneumo- ja keevkihtkuivatitel, kuid pneumokuivati vajab ühtlast osakeste jaotust (osakeste suurusjärgu kõikumine vaid ühe ühiku piires)[9], mida puu koorimisel ei teki. Seega käesolevas töös keskendutakse trummelkuivatile.

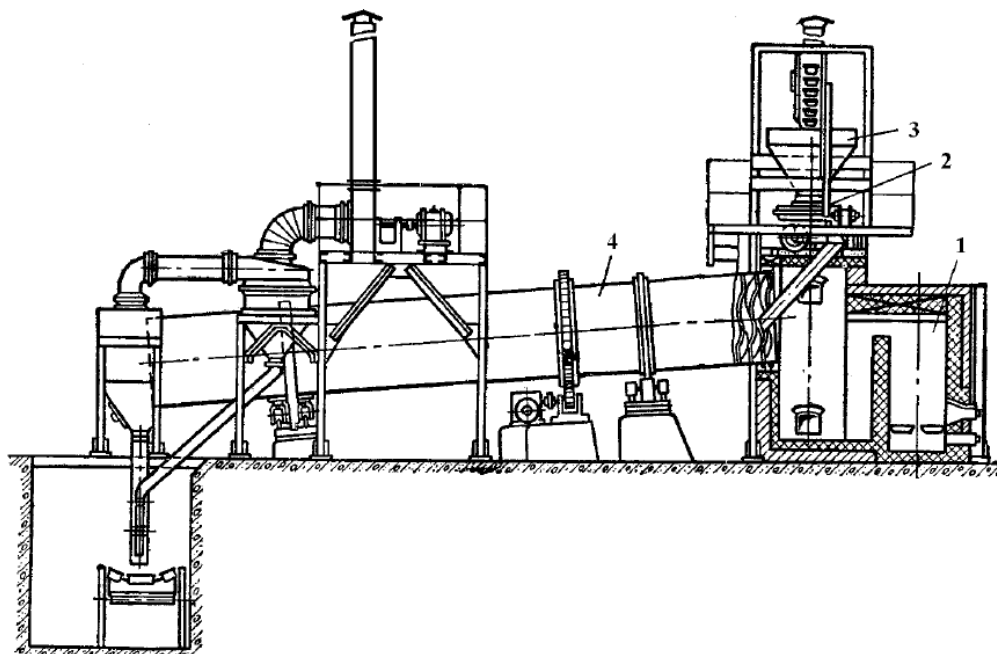
Kuivatamisel alla $100 \text{ }^\circ\text{C}$ -sel temperatuuril tuleb arvestada ka lenduvate orgaaniliste ühenditega. Need ühendid põhjustavad lämmastikoksiidi juuresolekul hapnikust osooni teket, mis võib põhjustada hingamisprobleeme. Üle $100 \text{ }^\circ\text{C}$ -ste temperatuuride puhul lenduvad puidust orgaanilised ühendid, näiteks puuvaigus leiduvad tõrvad või vaigud,

mis võivad kondenseeruda kuivati seintele, vähendades selle efektiivsust, või liikuda läbi võimalike filtrite korstnasse. Filtrite olemasolu oleneb õhusaaste eeskirjadest. [6], [8]

Orgaaniliste ühendite tõttu ning ka jääksoojuse ärakasutamiseks eelistatakse üldiselt madalatemperatuurilist kuivatamist. Jääksoojuse kasutamine on majanduslikult soodne ettevõttele. Temperatuuri tõstmine kiirendab protsessi, aga suurenevad ka soojuskaod ning see on kallim. Kõrge temperatuuriga kuivatusagensi saab kasutada vaid pidevas liikumises materjali puhul, kuna see välistab ülekuumenemise punktide tekke materjalis. Maksimaalse temperatuuri määrab materjal ja kuivamise protsess. [6]

1.4.1 Trummelkuivati

Trummelkuivati (kujutatud joonisel 1.2) on pidevtoimega kuivati, mis koosneb üldiselt horisontaalse või kaldus asetusega trumlist, mis pöörleb 0,5 – 8 pöörret minutis. Trumli diameeter võib olla olenevalt materjalikulust alla 1 kuni üle 6 meetri. Töötamise ajal puhutakse trumli sisse kuivatusagens, mis kontakteerub trumli pöörlemisest tekitatud kuivatatava materjali langeva kihiga. Kuivatusagensiks võib olla soojendatud õhk, suitsugaasid või suitsugaasi ja õhu segu. Biomassi kuivatamisel rakendatakse päri voolu kuivatit. [8], [9]



Joonis 1.2 Puistematerjali trummelkuivati [9]

1 – kolle, 2 – söötur, 3 – punker, 4 – kuivatustrummel

Trummelkuivatis saab kuivatada suurema osakeste jaotusega materjale võrreldes teiste kuivatitega. [8] Trummelkuivati on sobilik ka teiste tükkmaterjalide, nagu kivisöe, liiva, savi, lubja, maagi ja ka toiduainetööstuse jääk-produktide kuivatamiseks. [9]

Trummelkuivati töötab kõrgematel temperatuuridel, sisendi temperatuur võib olla lausa 600 kuni 650 °C. Materjali temperatuur on 70-80 °C. Trummelkuivati soojusvajadus on 4-6,3 MJ/kg niiskuse kohta. Üldine materjali kulu (kuivatamisel 50-61 %wb → 10-15 %wb) on 6-7 t/h. Keskmise elektrienergia kulu on 5-7 kWh/t. [8], [9] Kuivatit köetakse soojendatud õhuga, põlemisgaasidega või viimase seguga koos külma õhuga. Suitsugaaside või selle segu külma õhuga tuleks kasutada ainult juhul, kui on kindlaks tehtud, et kuivatatava kütuse kokkupuude kuumade suitsugaasidega ei halvenda selle omadusi või kvaliteeti oluliselt. [1], [9]

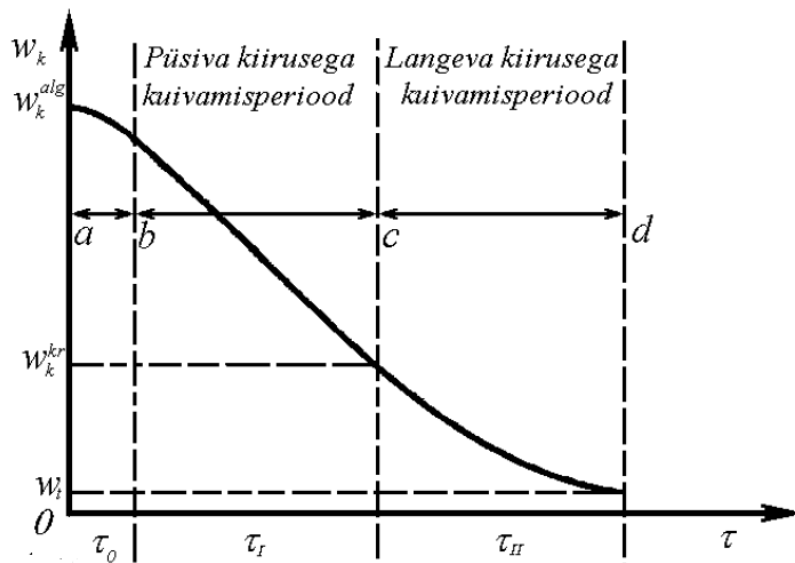
Kuuma sisendi ja puitkütuse puhul tuleb arvestada tekkivate puiduosakeste ja lenduvate ühenditega, kuna mingil määral toimub puidu termiline lagunemine. Ka tuleb arvestada võimaliku tuhasisalduse kasvuga materjalis suitsugaasidest tuleva lendtuha tõttu. Kõrge niiskussisaldusega metsamaterjali kuivatamisel on otstarbekas kasutada korduvringlust, et protsess toimuks madalamal temperatuuril. [9]

1.4.2 Kuivamise kineetika

Niiskussisaldus niiskes materjalis jaguneb kaheks – seotud ja mitteseotud. Seotud niiskus jaguneb veel keemiliselt ja rakkudesse seotud niiskuseks. Kuivatamisel eraldatakse mitteseotud vaba niiskust, mis on aine pinnal ning suuremates kapillaarides, ning ka osaliselt seotud niiskust. Seotud niiskus on osmootne ja adsorptsioonniiskus, mis on mikropoorides ja rakkude vahel, tugevalt seotud osmootsete ja molekulaarsete jõududega. Seotud niiskus on ka hüdraatvesi, mis on kinni molekulidevaheliste sidemetega. [10]

Mitteseotud niiskusel on puhta vee aururõhk. Niiskus on eraldatav veeauru partsiaalrõhu erinevuse tõttu keskkonnaga. Materjal on saavutanud tasakaaluniiskuse kui niiskuse ja keskkonna veeauru aururõhud on võrdsed, seega saab materjal kuivada ainult õhuniiskuseni. [10]

Kuivatamine on oma loomuselt difusiooniprotsess. Difusioon toimub molekulide vaba liikumise tõttu, kihtide vahelise kontsentratsioonide erinevuse tõttu. Kuivamiseks toimub esmalt soojuse ülekande materjalile, selle tõttu niiskuse difundeerumine materjali pinnale, niiskuse aurustumine ümbritsevasse keskkonda ning niiske õhu eemaldumine. [10]



Joonis 1.3 Kuivamiskõver [9]

w – niiskussisaldus, τ – aeg, a-b eelsoojendamise periood

Kuivatamise protsess saab kirjeldada kuivatamiskõvera (joonis 1.3) järgi. Selle baasil jaotub protsess kolmeks osaks.

- Eelsoojendamise periood, τ_0 : kuna õhk pole hea soojusjuht, neeldub enamus soojust materjali pinnalähedasse vette.
- Püsiva kiirusega kuivamisperiood, τ_I : periood algab kui materjal on piisavalt soojenenud ning pinnalt hakkab aurustuma vesi. Algab vee liikumine aurufaasi konstantse kiirusega kuni kriitilise niiskussisalduseni. Kriitiline niiskussisaldust kirjeldab punkt, kus materjali pind muutub hügrokoopseks, kuid materjali keskmine niiskussisaldus on sellest kõrgem. Kriitiline niiskussisaldus on seda suurem, mida suurem on materjalikihi paksus. Esimesel perioodil on materjalisisese niiskuse difusiooni kiirem kui auramine vabalt pinnalt, mis seega piirab kuivatamise kiirust. Kriitilise niiskuse punktis nende kahe difusiooniprotsessi kiirused võrdsustuvad.
- Langeva kiirusega kuivamisperiood, τ_{II} : Kiirust hakkab pidurdama niiskuse difusioon materjali sees. Teisel kuivamisperioodil tõuseb materjali pinna temperatuur kuivatusagensi temperatuurini. Kuivatusprotsess loetakse lõppenuks kui materjali keskmine temperatuur on võrdne kuivatusagensi omaga. Siis on ka materjali pinnalt aurustuva niiskuse kogus sama kui kuivatusagensist pinnale kondenseeruv niiskus.

Kuivamiskõveral võib olla kaks kriitilist niiskussisaldust, kui eraldub ka mikrokapilaaridest niiskus. [9]

Kütuse kuivusaste on oluline, sest kütteväärtus sõltub kütuse niiskuse sisaldusest – mida madalam on kütuse niiskuse sisaldus, seda suurem on kättesaadav energia massiühiku kohta. Niiskus mõjutab ka põletamise kulgu ja eralduvate gaaside hulka. Märjal kütusel on katlas pikem viibimisaeg, et kuivada ja põleda täielikult. Seega katla efektiivsus väheneb kütuse niiskusesisalduse tõusuga, kuid seda saab kompenseerida suitsugaaside kondensaatoriga. Märja kütust kuivaga segades saab kütuse niiskuse mõju katla efektiivsusele vähendada. Stabiilse põlemise juhtimiseks ja optimeerimiseks peaks kütuse niiskusesisaldus olema võimalikult konstantne. [1]

1.5 Aunastamine

Lihtsaim ja levinum biomassi hoiustamise viis on selle aunastamine, mis väljendub selle paigutamises piklikku hunnikusse.

Niiskes kütuses tõuseb temperatuur bioloogiliste protsesside toimel 60-75 kraadini auna sees esimese nädala jooksul. Kuivema kütuse korral tõuseb temperatuur hiljem [7]. Keemiliste reaktsioonide käivitumisel võib temperatuur aunas kasvada 105 kraadini ning vähese niiskuse puhul põhjustada isesüttimise. [1]

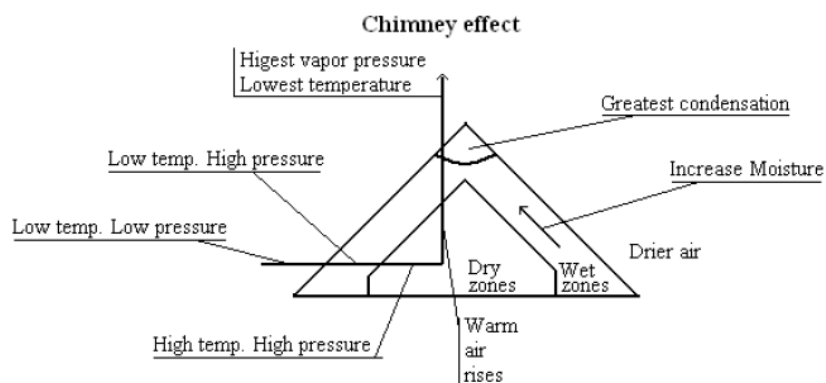
Soojuse teke algab põhikoe rakkudest. Protsess algab puidu mehhaanilisel töötlemisel, kui põhikoe rakud, milles on energiavarud tärglise kujul, vabastavad oma energia purustamisel. On täheldatud, et kui hoiustada materjali hakkimata, ei teki seal soojust. Siis ei ole aunas ka hõõrdumise soojust ja mikroobidel on vähem pinda, kus kasvada ning levida. [2]

Mikroorganismid võivad elada kooses või puidus juba puu metsas kasvamisel ning jätkata seal elu peale raiet. Raiumisel võib sattuda puu kokku mullaga, mis on koduks paljudele lagu-organismidele. Ka seisev vesi auna ümbruses võib olla allikaks vees elavatele bakteritele. Seente eosed ja spoorid võivad auna jõuda õhu kaudu ning areneda seal sobivate tingimuste olemasolul. [11] Puidus või kooses võivad elada ka eri putukate liigid, kelle vastsed ja tõugud võivad toituda puidust või ka nukkuda seal. Näiteks suur-toonesep (ld *Hadrobregmus pertinax*) kahjustab niisket okaspuu puitu, millel on juba eelnev seenekahjustus. [12]

Kui aunas on sobivad tingimused, hakkavad mikroorganismid kütust lagundama. Nad sünteesivad sellest soojust, vett ja süsihappegaasi. Nende lagundamise ja leviku kiirust mõjutavad niiskus, soojus, hapniku ja mikrotoitainete kättesaadavus. Leidub ka

baktereid, kes ei vaja hapnikku. Baktereid mõjutab ka pH, mis võib olla aunas kergelt happeline, lahustuvate orgaaniliste hapete tõttu. [1]

Soojust võib liigselt koguneda auna, kui see on liiga suur või kompaktne. Enamus sooja toodetakse auna tsentris, kust see liigub jahedamatesse väliskihtidesse. Selle tõttu tekib auna pealmistesse kihtidesse niiske ala. Kuivamine toimub seejärel auna välispinnalt, vee aururõhkude erinevuse tõttu auna ja keskkonna vahel, tekitades n.ö. korstnaefekti (kujutatud joonisel 1.4). Soojus tekitab aunas õhu vaba konvektsiooni. Õhk kannab veeauru auna pinnale, kust see saab aurustuda keskkonda. Sisemine materjal kuivab, kuid aur kondenseerub üleval ja jahedamates auna piirkondades. Väljast tuleb ilmastiku tõttu ka lisaniskiust. [1]



Joonis 1.4 Korstnaefekt kuivamisel [2]

Lagundavatest organismidest on levinumad seened – hallitusseen, puiduseened ja sinavusseened, ning ka mitmed bakteriliigid. Enamus neist vajavad hapnikku biomassi lagundamiseks. Seda protsessi kutsutakse aeroobseks lagundamiseks. Biomassi seisukohast mängivad suurimat rolli puiduseened. Hallitusseened ei lagunda palju, olulisemad on nad inimese tervise seisukohast. Hapniku puudumisel hakkab toimuma anaeroobne lagundamine, mille tulemusena tekivad metaan, alkoholid ja orgaanilised happeid. Puiduhunnikutes on üldiselt ülekaalus aeroobsed reaktsioonid hapniku kerge ligipääsetavuse tõttu.

Seened toituvad enamasti hemitselluloosist ja tselluloosist, kuid mingil määral ka ligniinist. Seentele sobiv temperatuur varieerub liigiti, kuid on üldiselt 20-40 °C juures. Leidub ka liike, kes jäävad ka ellu temperatuuridel kuni paar kraadi alla nulli või kuni 50 °C. Puiduseentele ja sinavusseentele on oluline ka kindel puidu niiskussisaldus ja vaba vee olemasolu. Nad ei kasva keskkonnas, kus niiskussisaldus on alla 23% või üle 70% [5]. Mikroorganismide poolt põhjustatud protsessid toimuvad kuni 60 °C, sellest

kuumemas keskkonnas väheneb intensiivsus kiirelt. Üle 60 °C hakkavad intensiivistuma keemilise oksüdatsiooni protsessid. [2]

Koores leidub suuremal hulgal tärkliisevarusid, ligniini, ekstraktiive ja metalle kui tüvepuidus. Selletõttu on kooreaunad paremad kasvulavad seentele. Seente rohkus põhjustab intensiivsemat soojuse teket ja kuivaine kadu. Vastukaaluks sisaldavad mõned koored seente kasvu pärssivaid ühendeid. [11]

1.5.1 Asukoht

Lihtsaim lahendus on hoiustada ja kuivatada õues. Õues kuivatamise miinused on ettearvamatu ilmastik ja logistika. Hoiustamiseks ette nähtud väljak peaks olema kattega, et vältida mineraalainete segunemist kütusesse (liiv, muld, kivid jne) ja tuhasisalduse tõusu. [1]

Õues lahtiselt auna hoiustamisel on kuivaine kadu suurim võrreldes muude variantidega. Auna võib hoiustada ka laohoones, katuse all või mõne materjali all, mis ei lase veel ligi pääseda, kuid laseb kuumal õhul välja pääseda, näiteks kangas või paber. Kaetud hunniku puhul täheldati positiivset mõju kütusele – madalamat niiskusesisaldust, kõrgemat kütteväärtust ja tuhasisaldust võrreldes katmata hunnikuga. [5], [11]

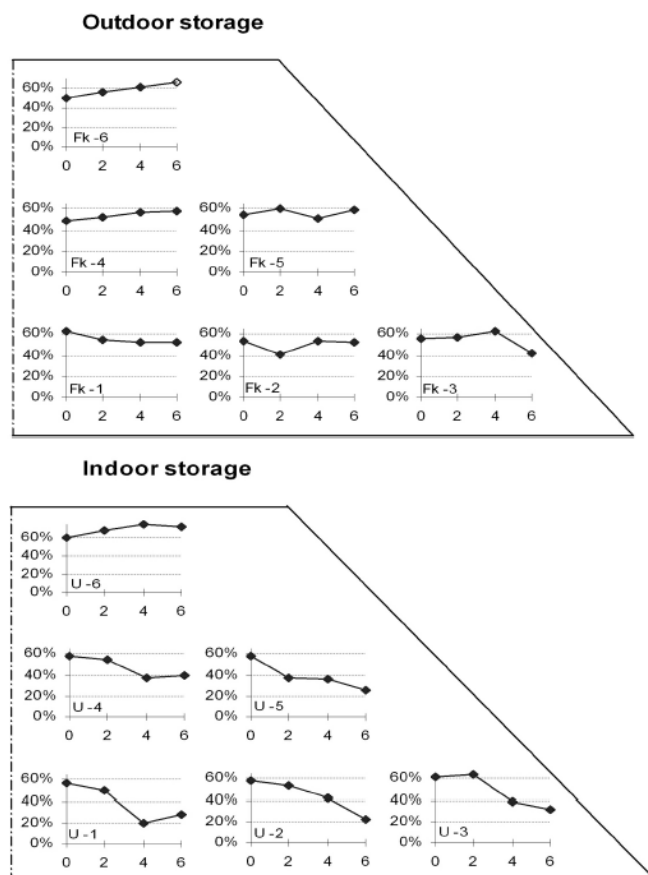
1.5.2 Kuivaine kadu ja niiskus

Kaad on kõige intensiivsemad aunastamise esimesel nädalal. Esimesel nädalal see ei mõjuta kütuse kvaliteeti. [2] Kaod sõltuvad kütuse niiskusesisaldusest (kõrgem niiskusesisaldus tekitab ka suuremad kadusid), materjali omadustest (värskel materjalil on suurem kadu kui seisnud, ka õlgedel on suurem kadu kui metsajäätmetel) ja osakeste suurusest (mida väiksem osake, seda suurem on materjali eripindala ja seda suurem kuivaine kadu). Värske puidu või koore aunastamisel võib kuivaine kadu olla kuni 5% kuus. [1]

Osakeste pikkus mängib suurt rolli kuivaine kaol. On täheldatud, et kui osakesed on keskmise diameetriga rohkem kui 120 mm, võib energiakadu olla -5...+5%, kuna selle puhul on väiksem kuivaine kadu ning niiskuse vähenemine hoiustamisel. [1]

Hoiustamine on mõttekam suurtes hunnikutes, sest seal on nii hakkepuidu kui ka raiejäätmete katmata ja kaetud hunnikute puhul väiksem kuivainete ja kütteväärtuse

kadu. Täheldatud on isegi kütteväärtuse tõusu kuni 4 m kõrguste raiejäätmete hunniku puhul, olles 4% katmata ja 4-10% kaetud kuhikus suveperioodil. [3]



Joonis 1.5 Niiskuse muutumine aunas kuude lõikes [1]

Siseruumides on kuivaine kadu oluliselt väiksem, sest kuna on näha joonisel 1.5, siis aun kuivab siseruumides palju paremini, mis pärsib kuivaine kadu tekitavate organismide ja protsesside kiirust. Joonisel 1.5 on võrreldud Lõuna-Austrias augustist jaanuarini toimunud katse tulemusi, kui õue ja lattu ladustati 3 m koorekuhikud. Väljas kuivas kuhik 59 %wb kuni 44 %wb-ni. Kuivaine kaotuse tõttu oli väljas seisvas hunnikus energia kadu ligi 12%. Siseruumis oleval kuhikul oli energiakadu minimaalne, kuna kuivatamise tõttu kütteväärtuse tõus oli tasakaalus bioloogilise lagunemise kaoga. [1] Ventilatsioon vähendab kuivaine kadu, kuna kuivatab kuhikut, kuid see on kulukas, sest vajab suurt väljaminekut ning pidevat ja odavat soojusallikat. Vaba konvektsiooni edendamiseks, ilma kuivatisse investeerimata, saab ehitada läbilaskvate seintega lao. Selline ladu vähendab ka isesüttimise riski. [1]

Katteta hunniku puhul tuleks arvestada veel, et hunnik langetab vihmaste ilmade ajal sademevee pH-d (2,5 – 5,0), kuna seal lahustuvad puidult (eriti koorelt) orgaanilised happed. [1]

1.5.3 Isesüttimine

Isesüttimise eelduseks on bioloogilised protsessid, mis tõstavad temperatuuri keemilistele reaktsioonidele sobivaks. Keemiliste protsesside tulemusel võib temperatuur tõusta kuni 105 °C-ni. Hunniku halva soojuslevi korral akumuleerub soojus ja temperatuuri kiire tõusu tõttu tekib hunnikus iseeneslik pürolüüs. Leegiga põlemine algab väliskihti jõudes. [2] Täpset temperatuuri pürolüüsiks ei eksisteeri, see oleneb materjali omadustest ja katalüsaatorite olemasolust, aga nõuab kindlat hapnikku kontsentratsiooni. [5]

Isesüttimine on uuringute põhjal välditav teatud abinõusid rakendades. Suuremate osakeste suurusega (üle 20 cm) ei tõuse temperatuur keemilise lagunemise protsesside jaoks piisavalt kõrgeks. Koore puhul saab isesüttimist vältida kui kuhik on alla 8m ja seisab vähem kui 11 kuud. Materjali kokku surumisel muutub niiskuse jaotus ebahomogeenseks ja see tõstab isesüttimise ohtu. [1] Isesüttimist soodustab ka osakeste ebahomogeensus. Isesüttimise vastu on mitme kuhiku puhul eelistada mitut väiksemat kuhikut kui ühte suurt. [2] Lahenduseks võivad ka olla kemikaalid seente vastu, hoiustamine ilma lehtedeta või hoida niiskus alla 25% või üle 70%. [5]

Aunade kontrolli on kõige otstarbekam teha temperatuuri ja gaasianalüüsiga. Uuritavad punktid peaks olema aunas laiali, et avastada ka lokaalseid koldeid. Varajases staadiumis võib isesüttimise potentsiaalile viidata CO₂ sisaldus. Hilisemas staadiumis, kui on juba tuleoht ja peab rakendama leevendusmeetmeid, teavitab ohust CO kontsentratsioon. [1]

1.5.4 Muud mõjud

Siseruumides hoiustades tuleb mõelda töötajate tervise ohutusele, kuna lagunev puit on allikaks spooridele, lenduvatele orgaanilistele ühenditele ja tolmuks. Need kõik võivad tekitada ärritust ja tõsisemaid haigusi pikaajasel kokkupuutel. Spooride levikut soosib eriti kütuse kuivus ja õues hoiustamisel kuiv, päikseline ilm. Oluline on nakatunud kütuse käsitlemisel isikukaitsevahendite kasutamine. [2]

Üldiselt peaks kütteväärtus langema bioloogilise lagunemise tõttu, kuid mõnel juhul võib kütteväärtus olla isegi kõrgem peale hoiustamist, sest mikroorganismid toituvad väheväärtuslikest ühenditest nagu tselluloos ja hemitselluloos ning kõrgväärtuslike ühendite, ligniini ja ekstraktid, osakaal suureneb. Kogu materjali energia sisaldus on aga vähenenud, sest toimunud on ka kuivaine kadu. [2]

Tuhasisaldus suureneb protsendiliselt kuivaine kao tõttu, sest anorgaaniline tuhk ei lagune, aga orgaaniline kütuse osa laguneb. Tuhasisaldus võib tõusta ka ebakorrekse käitlemise tõttu. [2]

Mõjusid on võimalik minimeerida rakendades FIFO (*first in first out*) põhimõtet, mitte LIFO-t (*last in first out*). Auna tuleks panna homogeenne, sama tüüpi ja võimalusel suuremate osakestega materjal. Hunnikus toimub parem ventilatsioon ja on väiksem eripind, mis on ebasoodne keskkond mikrobiotale. Aunad tuleks hoiustada väljas, et tagada turvaline keskkond töötajatele. [2]

2. Eksperimentaalne osa

Bakalaureusetöös tutvuti Vara saematerjali tootmisprotsessiga ning uuriti aunastatud puukoorte niiskusesisalduse, kütteväärtuse ja tuhasuse muutumist. Analüüsitud puukoored olid aunastatud 2019. aasta novembri lõpust 2020. aasta aprilli alguseni. Analüüsi tulemustega soovitakse teaduslikult kontrollida aunastamise efektiivsust.

2.1 Vara Saeveski

Vara Saeveski OÜ on 2000. aastast Tartumaal, Peipsiääre vallas, Vara külas tegutsev puidutööstusettevõtte. Ettevõtte müüb okaspuupalgist toodetud saematerjali ehitus-, mööbli- ja puidutööstustele Eestis ja välismaal. Aastane kuuse ja männi saematerjali maht on kuni 120 000 tm (tihumeetrit, 1 m³ ilma õhuvahedeta puitmassi ruumala). [13] Palgist saematerjali tootmiseks eemaldatakse palgilt koor. Koore eemaldamine on vajalik enne lahti saagimist, et järgmises faasis tekkiv saepuru ja tselluhake ei sisaldaks puidukoort. Aastas tekib palkide koorimisel ligikaudu 36 000 pm³ (puistekuupmeeter, mis väljendab 1 m³ suuruses mahus vabalt sisalduvat puitkütust) puukoore jäätmeid (4 pm³/h). Lisaks koorimisele, tekib aastas kuni 6000 pm³ koore- ja oksajäätmeid sorteerimis- ja pööramisliinil. Tootmisprotsessis tekkinud puukoore jäätmeid kasutatakse katlamajas saematerjali kuivatitele soojuse tootmiseks. Puukoorte kõrge niiskusesisalduse tõttu hoiustatakse märg kütus aunadena ettevõtte tootmisterritooriumil. Ettevõtte hoiab puukoori aunas kogemuslikult kolm kuud enne katlasse suunamist.

2018. aastal alustatud ettevõtete ressursitõhususe investeeringuga soetati 6 MW võimsusega biomassi katlamaja, mis suudab põletada 35-65% kütuseniiskusega kütust. Ettevõtte varasem 3,5 MW tahkekütuse katlamaja ei võimaldanud niisket kütust efektiivselt põletada. Lisaks on uus katlamaja varustatud suitsugaaside pesuriga võimsusega 1,8 MW. [14], [15] 2019. aastal ehitatud katlamajaga soovitakse vähendada sisse ostetava kuiva kütuse kogust, asendades seda tootmisprotsessis tekkivate puidujäätmetega.

2.2 Proovivõtt

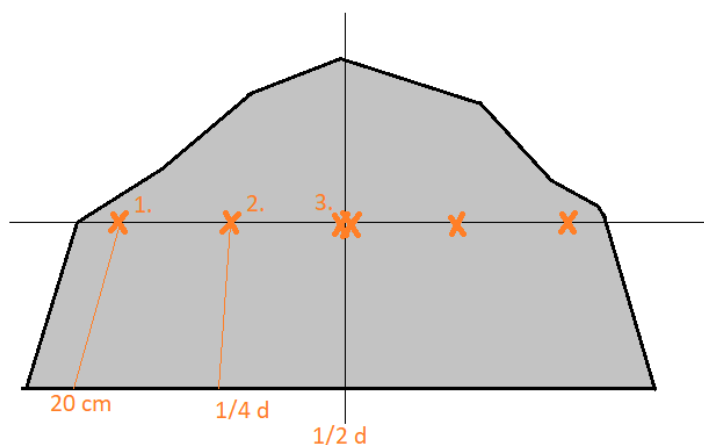
Aunas on arvestatav kogus puitkütust, kuid kõike pole võimalik auna kirjeldamiseks analüüsida. Seega on kogu auna iseloomustamiseks olulisel kohal esinduslik proovivõtt. Esinduslikus proovis iseloomustavad väikses proovikoguses uuritavad suurused kogu materjali näitajaid. Suurte, heterogeensete uurimisobjektide puhul määrab esindusliku proovi võtmine ära kogu katse edukuse. [16] Proovivõtt teostati Vara Saeveski poolt autori koostatud eeskirja alusel. Eeskiri oli kokku pandud standardi ISO18135 põhjal.

Auna lahti kaevata ülevalt poolt 4/5 kõrguse ulatuses või külgedelt. Kaevamisel jälgida, et ei toimiks segunemist alumiste ja pealmiste kihtide vahel. Proovi väljakaevamiseks kasutada kühvlit või labidat (teoorias ka tigupuuri (*auger*)), mis on eelnevalt puhas muudest puiduproovidest. Proovipunktide ristlõikelise asukoha muudu puhul jälgida, et proovivõtu tööriistal poleks eelneva proovi tükke küljes, et vältida proovide saastumist. Samuti tuleks jälgida, et proovis oleks vaid uuritav biomass.

Proovid tuleks võtta kindlatelt sügavustelt. Käesolevas töös võeti proove ainult ühelt poolt, joonise 2.1 alusel:

1. Pinnalt 20 cm
2. Ühe neljandiku pealt
3. Auna keskelt

Proovivõtu kõrgus peab olema võrdne auna poole kõrgusega. Sügavus ehk x-telg, mis jookseb piki auna peab olema ka vähemalt 50 cm (või jagada auna pikkus proovivõtu kordadele ja otsaosadele järgi n -osaks ja sellega arvestada auna lahtikaevamisel).



Joonis 2.1 Proovivõtu punktide paigutus

Materjali on vaja võtta igast punktist vähemalt neli liitrit osakeste suuruse jaotuse tarvis. Jaotus teostatakse üks kord katseperioodi alguses ning eeldatakse, et see on

homogeenne kogu aunas. Niiskuse jaoks kuivatatakse kõik olemasolev materjal. Tuhasuse ja kütteväärtuse jaoks materjal peenestatakse. Peenestatud proovi on vaja minimaalselt 25 g. Keskmiste väärtuste saamiseks tuleb võtta mitmekesine valik proovist purustamisel ja need segada, et lõpptulemusena saada esinduslik proov.

Proov tuleb panna õhukindlasse konteinerisse (näiteks taassuletavasse plastkotti või kaanega plastämbrisse). Kui konteiner on läbipaistev, siis jälgida, et see ei seisaks pikemat aega otsese päikesevalguse käes. Proov tuleks toimetada võimalikult kiiresti laborisse (24 tunni jooksul). Proovinõu peale märkida aeg, kuupäev ja proovipunkt, millest see on võetud (sügavus või siin kasutatud nummerdus). [17]

Järgmisel proovivõtul tuleb auna kaevata edasi mööda pikitelge, jälgides, et seda ala pole juba varem lahti kaevatud ning jääks ka piisavalt auna pikkust järgmisteks proovivõttudeks.

Selle eeskirja põhjal analüüsiti kahte auna – veebruaris aunastatud koor ja detsembris aunastatud koor. Mõlemal kuul aunastati kuusekoort. Veebruaris aunastatud koore puhul ei mänginud nii suurt rolli proovivõtu punkt, pigem algmaterjalist esindusliku proovi saamine. Detsembris aunastatud koort hakati kütma märtsis ning sealt võeti proovid kuu aja jooksul piki auna kolmel eri sügavusel mõõtepunkti, nädalaste vahedega.

Kõik analüüsid teostati Tallinna Tehnikaülikooli Energiatehnoloogia Instituudi laboris.

2.3 Biokütuse kvaliteedi hindamine

Kütuse kvaliteet pole kirjeldatav üheste arvuliste väärtustega. Kvaliteet väljendub kui „sobivus eesmärgi jaoks“. Eesmärgiks on käesolevas kontekstis võimalikult efektiivne kütusest energia kättesaamine. Kütuse iseloomu on vaja teada, et võtta kasutusele õigete parameetritega katel ning reguleerida seda töö käigus, et tagada kütuse täielik põlemine ning võimalikult suur kasutegur. [1], [18]

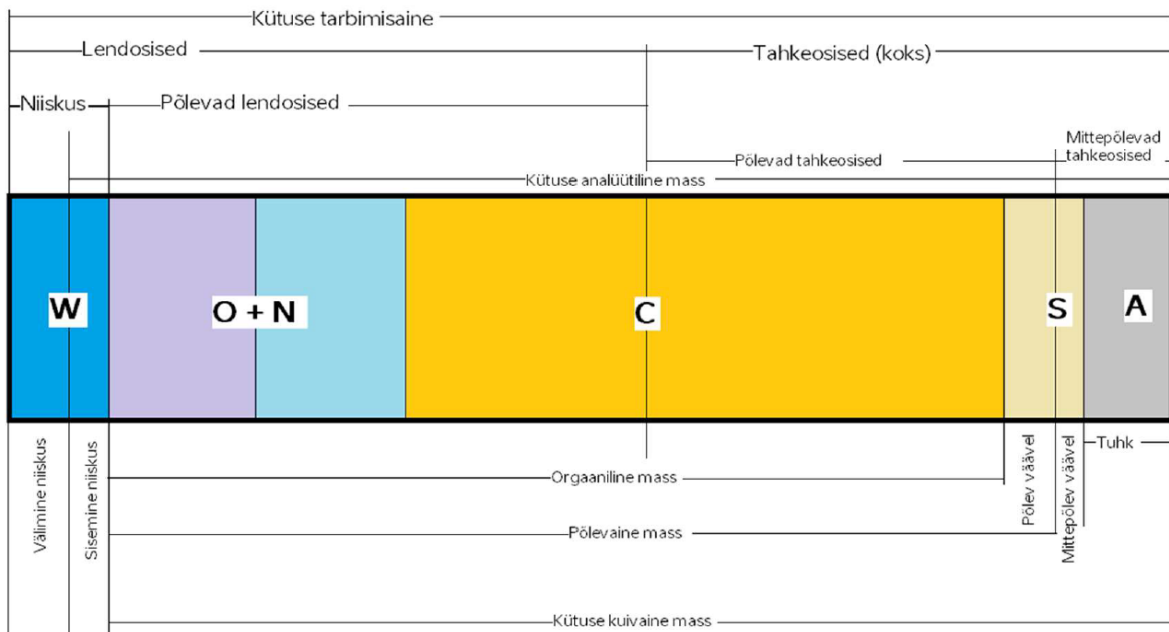
Kütuse kvaliteeti hinnatakse peamiselt järgnevate suuruste baasil:

- Kütteväärtus
- Niiskus
- Tuhasisaldus
- Põlevaine koostis

- Lendaine osakaal
- Tuha koostis
- Tuhasulamise temperatuur [6]

Siin töös hinnatakse kütuse väärtust ainult esimese kolme suuruse kaudu, kuna ülejäänud suuruste hindamine on keerukas ja bakalaureusetöö vaatepunktist puudub neil olulisus.

Kütust iseloomustavad näitajad saab jagada kaheks: osa neist on kontrollitavad, näiteks niiskus, osakeste jaotus, temperatuur jt., kuid osa mitte, nagu keemiline koostis, tihedus jt [18]. Keemilisest koostisest oleneb nii kütteväärtus, nii põlemisgaaside kui ka tuha omadused.



Joonis 2.2 Kütuse koostis [19]

Kütuse lihtsustatud koostis on esitatud joonisel 2.2. Puitkütuse koostise moodustavad põhiliselt kolm elementi – süsinik, vesinik ja hapnik. Lisaks on seal ka väävlit, lämmastikku ja mingil määral kloori. Väävlisisaldus on oluline väävliheitmete seisukohast ning võib ka põhjustada madalatemperatuurilist korrosiooni suitsukäikudes. Osa väävlit on võimalik siduda tuhka, kuid selle hulk oleneb leelismetallide kontsentratsioonist (eriti Ca) tuhas ja ka tuhasidumise tehnoloogiast. Lämmastik oksüdeerub NO_x -deks. Kloor mõjutab küttepindade korrosiooni. Kloori leidub palju okastes ning see aurustub põletamisel täielikult vesinikkloriidina, Cl_2 -na või moodustab

tuhka kloorühendid leelismetallidega. Raskmetallide sisaldus pole puidus ohtlikult suur, kuid rangete keskkonnanõuete puhul tuleb ka nendega arvestada. [1], [3]

Puukoore keskmine elementkoostis ja tuhasisaldus on esitatud tabelis 2.1.

Tabel 2.1 Puukoore keskmine koostis

Koostis	Kuusekoor, [20] baasil % db	ISO18125 tuhavaba koor, [21] baasil % db
C	49,4-54,7	100- H- O- N- S- A
H	5,1-5,9	6,1
O	37,7-41,4	40
N	0,36-0,40	0,4
S	0,02-0,07	0,1
Cl	0,01-0,03	-
Tuhk	1,8-3,8	18122:2015 baasil

Elemendid on puidus seotud ühenditena – põhiliselt süsivesinikena (tselluloos, hemitselluloos) ning ligniina. Tselluloos ja hemitselluloos koosnevad glükoosi molekulidest ja muudest suhkrutest. Ligniin annab puidule mehhaanilise tugevuse, „kleepides“ tselluloosi molekulid kokku. Tselluloos moodustab 40-50% kuivainest, hemitselluloos 25-35%, ligniin 18-35% [18] ja ekstraktid 2-4%. Ekstraktid koosnevad tõrvast, fenoolidest ja vaigust. Ühendite osakaalud olenevad puiduliigiti ning ka piki puud. [2], [3]

2.3.1 Niiskus

Niiskust biomassis saab kirjeldada kahte moodi: niiske materjali kohta ja absoluutselt kuiva materjali kohta.

$$w_{SW} = \frac{\text{vee mass}}{\text{niiske materjali mass}} \cdot 100\% = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

kus w_{SW} – niiskusesisaldus niiske materjali kohta, %wb

m_0 – tühja panni kaal, g

m_1 – panni ja proovi algkaal, g

m_2 – panni ja proovi lõppkaal, g

$$w_S = \frac{\text{vee mass}}{\text{kuiva materjali mass}} \cdot 100\% = \frac{100 \cdot w_{SW}}{100 - w_{SW}} \quad (2.2)$$

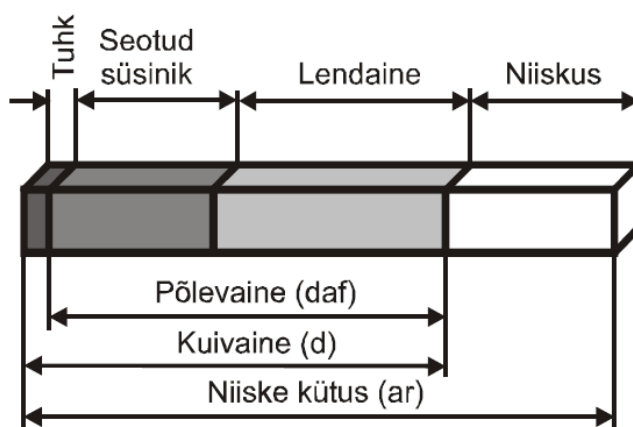
kus w_S – niiskusesisaldus kuiva materjali kohta, %wb

Niiskus varieerub suurelt, oleneb biomassi omadustest, lõikamise aastaajast, hoiustamise ajast ja muudest faktoritest. Näiteks värskes kuuse kooses on niiskussisaldus 38-60 %wb. Õhukuiv puit on niiskussisaldusega 1-3 %wb. [1], [3]

2.3.2 Kütteväärtus

Kütteväärtus on kütuse massiühiku põlemisel vabanev energiahulk, mille määrab ära kütuse keemiline koostis. Kütteväärtuse määramine toimub kalorimeetrilises pommis, kus hapniku keskkonnas proov täielikult põleb ja veeaur kondenseerub ehk leitakse kuivaine ülemine kütteväärtus. [2]

Kütteväärtust on võimalik esitada nii alumise kui ka ülemise kütteväärtusena. Ülemine kütteväärtus on kütus, milles eeldatakse, et kütuse niiskusest ja vesiniku põlemisproduktidest suitsugaasidesse sattunud niiskus kondenseerub täielikult ja vabastab kondensatsioonisojuse. Alumise kütteväärtuse puhul vee kondenseerumist ei arvestata. [3] Kuivaine puhul on tegemist ilma niiskuseta kütusega ning tarbimisaine puhul kütusega, mida kasutatakse energia saamiseks. Aunastamise puhul ühtib tarbimisaine niiske kütuse definitsiooniga, joonise 2.3 põhjal.



Joonis 2.3 Kütuse koostis [3]

Tüvepuidu põlevaine koostis on küllaltki stabiilne, mistõttu saab kõikide puuliikide puhul rääkida praktiliselt püsivast ja võrdsest põlevaine kütteväärtusest. See on eri süsivesinike osakaaludest. Tselluloosi kütteväärtus on 17-18 MJ/kg kuivaine kohta, hemitselluloosil 16-17 MJ/kg kuivaine kohta, ligniinil 25-26 MJ/kg ning ekstraktidel 33-38 MJ/kg. Selle tulemusena jäävad eri puude eri osade kuivaine alumised kütteväärtused vahemikku 18,6-22,8 MJ/kg. Kuusekoore kuivaine alumine kütteväärtus on kirjanduse andmetel enamasti 18,80 MJ/kg, kuid võib jääda vahemikku 18,40-20,31

MJ/kg. Kuivaine ülemine kütteväärtus on kuusekoore puhul 19,51-20,47 MJ/kg. [2], [3], [20]

Kütteväärtus esitatakse enamasti MJ/kg või kJ/kg. Töös on kütteväärtus esitatud nii tarbimis- kui ka kuivaine kohta.

Kuivaine ülemise arvutamine:

$$Q_{k,\ddot{u}} = q_{V,gr,d} = q_{V,gr} \times \frac{100}{100 - w_a} \quad (2.3)$$

kus $q_{V,gr}$ (ingl k *Gross calorific value, GCV*) – ülemine kütteväärtus, mille väljastab kalorimeeter, arvestades ka süttimise energiat, süütenööri põletamist ja soojuslikke efekte kõrvalreaktsioonidest, MJ/kg

w_a – analüütilise niiskuse sisaldus ehk niiskus, mille materjal neelab õhust peale kuivatamist, %wb

$q_{V,gr,d}$ (ingl k *Gross calorific value dry matter basis*) – kuivaine ülemine kütteväärtus, mille puhul on arvestatud ka analüütilist niiskust, MJ/kg

Kuivaine alumise kütteväärtuse arvutamine:

$$Q_{k,a} = q_{p,net,d} = q_{V,gr,d} - 212,2 \times w(H)_d - 0,8 \times [w(O)_d + w(N)_d] \quad (2.4)$$

kus $q_{p,net,d}$ (ingl k *net calorific value, NCV*) – kuivaine alumine kütteväärtus, mis on arvutatav konstantse rõhu kohta GCV kaudu, MJ/kg

$w(H)_d$ – vesiniku massiprotsent kuivas kütuses, %db (kg elementi kg kuiva kütuse kohta)

$w(O)_d$ – hapniku massiprotsent kuivas kütuses, %db

$w(N)_d$ – lämmastiku massiprotsent kuivas kütuses, %db

Tarbimisaine alumise arvutamine:

$$Q_{t,a} = q_{p,net,w} = q_{p,net,d} \times (1 - 0,01M) - 24,43W \quad (2.5)$$

kus $q_{p,net,w}$ (*net calorific value wet matter basis*) – alumine kütteväärtust, arvestades üldniiskust, kus ei saada kätte kodenseerumissoojust konstantsel rõhul, MJ/kg

W – kütuse niiskusesisaldus, %wb [21]

2.3.3 Tuhk

Kütuse tuhasus näitab puidu termilisel töötlemisel, kui ära on põletatud põlevaine ja aurustatud vesi, tekkinud mineraalse jäägi massi puidu algmassi suhtes. Puidu termiline lagunemine algab 150 °C juures. Kütuse süttimise temperatuur oleneb kütuseliigist, okaspuu puhul on see umbes 220 °C juures. Põhiliselt eralduvad põlemisel CO₂, H₂O, NO_x ja SO₂. [3] Järele jääb tuhk, mis koosneb peamiselt süsinikust. [20] Biokütuste tuhas on Mg, K, Ca, P, Na ja Si peamised tuhka tekitavad elemendid. [1]

Tuhasisaldus arvutatakse järgneva valemi baasil:

$$A_{ar} = A_d \cdot \frac{100}{100 - w_a} \quad (2.6)$$

,kus A_d – tuhasisaldus kuiva kütuse kohta, %

A_{ar} – tuhasisaldus niiske kütuse kohta, %

w_a – analüütiline niiskus, %wb

Tuhasisaldus on oluline põletamise tehnoloogia valikul. Soojuse tootmisel on eelistatud madala tuhasisaldusega kütused, kuna väiksemad tuha kogused lihtsustavad selle transporti, ladustamist, taaskasutamist ja kõrvaldamist. Suure tuhasisaldusega kütused tekitavad rohkem lendosakesi ning mõjutavad soojusvaheti disaini, efektiivsust ning ka tuhasidumise viisi. [1]

2.3.4 Kvaliteedinäitajate määramine

2.3.4.1 Niiskuse määramine

Käesolevas töös määrati üldniiskus standardi ISO 18134-2:2017 järgi. Töö käik on järgmine:

- Esmalt kaaluti tühi ja puhas kuivatamise pann lähima 0,1 g-ni. Proov kanti pannile ühtlaselt nii, et see ei ületaks 1 cm² 1g kohta ja minimaalne proovi mass oleks 300 g.
- Pann kaaluti enne kuivatamist koos prooviga lähima 0,1 g-ni.
- Pann asetati õhutusega ahju, kus temperatuur on 105 ± 2 °C. Õhk peaks ahjus vahetuma kolm kuni viis korda tunnis. Õhu liikumise kiirus peab olema selline, et õhuvoolud ei hakkaks liigutama proovi osakesi.
- Proovi kuivatati kuni proovi mass ei muutu rohkem kui 0,2% 60 minuti jooksul.
- Proovi kaaluti 10 kuni 15 sekundi jooksul peale panni ahjust eemaldamist, et ei toimuks niiskuse tagasisidumist.
- Proovide kuumutamise aeg ei tohiks olla pikem kui 24 tundi.

- Proovi niiskussisaldus arvutada valemi 2.1 järgi ja ümardada lähima 0,1%-ni. [22]

Analüütiline niiskus, mis on tarvilik tuhasisalduse ja kütteväärtuse täpseks arvutamiseks, määrati standardi ISO 18134-3:2015 baasil. Katse käik on järgmine:

- Valmistatakse ette proov, mis peab olema peenestatud nii, et 95% proovist on alla 1 mm osakeste suurusega.
- 105 ± 2 °C juures kuivatati kuuma- ja korrosioonikindel ning sobivate mõõtmega kaanega anum, mis jahutati toatemperatuurini eksikaatoris.
- Anum koos kaanega kaaluti lähima 0,1 mg-ni. Nõusse lisati ühtlase kihina proov (umbes $0,2 \text{ g/cm}^2$) ja kaaluti lähima 0,1 mg-ni. Proovi kaalutis peaks olema vähemalt 1 g. Eelnevalt segati proov korralikult, et tagada homogeensus.
- Katmata anum koos prooviga ja kaas kuumutatakse kontrollitava temperatuuriga ahjus 105 ± 2 °C juures püsiva massini.
- Püsiv mass on saavutatud, kui massi muutus ei ületa 1 mg 60 minuti jooksul. Kuivatamise kestvus sõltub osakeste suurusest, õhuvahetuse kiirusest ahjus ja materjalikihi paksusest.
- Kuivatamise aeg ei tohi ületada 3 h.
- Proovi ahjust väljatõstmisel pandi anumale koheselt peale kaas ja tõsta anume eksikaatorisse, kus see jahtus toatemperatuurini.
- Jahtunud anum kaaluti võimalikult kiiresti, kuna väikeste osakestega biokütused on väga hügrooskoopseid.
- Proovi niiskussisaldus arvutada valemi 2.1 järgi ja ümardada lähima 0,01%-ni. [23]

2.3.4.2 Sõelanalüüs

Mõlema auna jaoks tehti sõelanalüüs standardite ISO17827-1:2016 ja ISO17827-2:2016 alusel. Suuremad fraktsioonid sõeluti järgnevate sõeltega: 80 mm, 50 mm, 20 mm, 15 mm, 10 mm, 5 mm, sõeluti manuaalselt. Väiksemad fraktsioonide jaoks kasutati järgnevaid sõelu: 3,15 mm, 2,80 mm, 2,00 mm, 1,40 mm, 1,0 mm, 0,5 mm, 0,25 mm ja põhi. Sõeluti automaatse sõelaga.

Sõelanalüüsiks on minimaalne proovi maht 4 liitrit. Proovis sisalduvate osakeste suurusest olenevalt võib seda sõeluda mitme eraldi portsjonina. Proovi niiskus peaks olema alla 20 %wb, et vältida osakeste kokku kleepumist ja niiskuse kadu sõelumisel. Vajadusel kuivatada proov standardi ISO 18134-2:2017 järgi. Pealmise sõela peale ei

tohi jääda kiht üle 5 cm. Testportsjon kaaluda lähima 0,1 g-ni. Panna kokku sõelumise torn, ülalt poolt väheneva augu suurusega ja kogumispanniga põhjas (suuremate fraktsioonide puhul kasutati sõela suuruse tõttu üht sõela korruga). Materjal kanda ühtlaselt ülemisele sõelale ja alustada sõelumist. Katse soovitatavaks kestvuseks on 15 minutit. Pikema aja jooksul tuleks arvestada hõõrdumise ja suurema peenekeste osakeste fraktsiooniga. Osakesed mõõtmetega üle 100 mm peavad olema käsitsi välja korjatud, olenemata sõelast, kus nad asuvad. Osakesed, mis jäävad kinni sõela piludesse, kuuluvad sõelapealsesse fraktsiooni. Fraktsioonid kaaluda 0,1 g täpsusega. [24]

Fraktsioonide, mille suurus on alla 3,15 mm, ei tohi pealmisele sõelale jääv materjali kiht ületada 2 cm. Kui jääb rohkem või proovi mass on üle 50 g, jagatakse sõelutav materjal portsjoniteks. Samamoodi ei tohi proovi niiskusesisaldus olla üle 20 %wb. Testportsjon kaalutakse lähima 0,01 g-ni. Pannakse kokku sõelumise torn, ülalt poolt väheneva augu suurusega ja kogumispanniga põhjas. Materjal kantakse ühtlaselt ülemisele sõelale ja alustatakse sõelumist. Katse kestvus määratakse eeltestiga, kus sõelumise kestvus on kuni eri sõeltel proovi massi muutuseni vähem kui 0,3 % abs. Töös kasutati sõelumist kestvusega 12 - 15 minutit, sõltuvalt proovi iseloomust. Sõela amplituud sõltub masinast, siin oli amplituudiks 0,5 mm. Pikema sõelumise aja jooksul tuleks arvestada hõõrdumise ja suurema peenosakeste fraktsiooniga. Ka siin need osakesed, mis jäävad kinni sõela piludesse, kuuluvad sõelapealsesse fraktsiooni. Fraktsioonid kaaluti 0,01g täpsusega. [25]

2.3.4.3 Kütteväärtuse määramine

Kütteväärtuse, tuhasuse ja analüütilise niiskuse jaoks purustati proov veskis Fritsch Pulverisette.

Kütteväärtuse määramiseks on laboris IKA C2000 ja IKA C5000 pomm-kalorimeetrid. Kütteväärtuse määramiseks proov peenestati, segatud ja niiskus tasakaalustati väliskeskkonna niiskusega ning määrati niiskussisaldus (vt alapunkt 2.3.4.1). Seejärel proov pressiti kokku kompaktselt tabletiks biokütuste madala tiheduse tõttu. Tableti mass oli $1,0 \pm 0,2$ g. Edasine katse käik on järgmine:

- Tablett kaaluti tiiglisse 0,1 mg täpsusega.
- Veenduti süütetraadi pingul olekus kahe elektroodi vahel.
- Süütenöör seoti süütetraadi külge, tiigel asetati selleks ettenähtud kohta ja nöör asetati kontakti tabletiga.

- Pommi lisati $1 \pm 0,1$ ml destilleeritud vett. Kõik osad kinnitati tihedalt pommi külge, pomm asetati kalorimeetrisse ja käivitati mõõtmine.
- Mõõtmise lõppemisel eemaldati pomm kalorimeetrist ning aeglaselt ühtlustati pommi rõhk atmosfäärirõhuga. Peale pommi lahti võtmist eemaldati võimalikud jäägid pommist. Pomm ja tiigel pesti destilleeritud veega.
- Katset korrati. Tulemus esitati 10 J/g täpsusega. Tahkete biokütuste puhul on lubatud absoluutne erinevus paralleelkatsete vahel 140 J/g. Korratavuseks on 400 J/g. [21]
- Ülemised ja alumised kütteväärtused arvutatakse valemite 2.3-2.5 järgi.

2.3.4.4 Tuhasisalduse määramine

Tuhasisalduse määramine tehti standardi ISO18122:2015 põhjal. Töö käik on järgnev:

- Esmalt kuivatati ning homogeniseeriti proov.
- Portselantiigli ettevalmistamiseks kuumutati seda 550 °C juures tund aega. Pärast kuumutamist tõsteti tiigel esmalt kuumakindlale plaadile viieks kuni kümneks minutiks jahtuma ja seejärel eksikaatorisse, kuni see jahtus keskkonna temperatuurini.
- Tiigel kaaluti lähima 0,1 mg-ni. Tiiglitse kaaluda umbes 1 g kuivatatud materjali.
- Tiigel pandi koos prooviga külma ahju (Nabertherm) ja kuumutati 550 ± 10 °C.
- Kuumutamise kiiruseks on 6 °C/min ning 550 °C kraadi juures hoiti tiiglit vähemalt poolteist tundi.
- Kuumutamise lõpus toimiti samamoodi kui tühja tiigliga - tõsteti see esmalt kuumakindlale plaadile viieks kuni kümneks minutiks jahtuma ja seejärel eksikaatorisse, kuni see oli jahtunud keskkonna temperatuurini.
- Tuhasisaldus arvutada valemi 2.6 alusel ning ümardada lähima 0,1%-ni. [26]

3. Tulemuste analüüs

Töös analüüsiti kahte Vara Saeveski auna. Esimesena uuriti veebruaris üles seatud kuusekoorega auna. Peale seda uuriti detsembris aunastatud kuusekoorest auna, kust võeti kuu aja jooksul neli proovi. Uuritava auna mõõtmed olid 45 x 18 m ning kõrguseks 11 meetrit, mis teeb hunniku mahuks 3670 pm³. Auna tegemist alustati 21.11.2019 ja lõpetati 8.12.2019, seega aun oli esimeseks proovivõtuks seisnud ligi kolm kuud, täpsemalt 95 päeva.

Proove võeti samaaegselt kui hakati kütust katlasse suunama FIFO meetodi alusel. Proovid võeti kuu aja jooksul piki auna. Peale seda kuud oli ka kogu aun suunatud katlasse. Proove ei võetud varem, kuna auna lahutamine kuivamise ajal rikub temperatuuri ja kuivamise homogeensust.

Proovide võtmise kuupäevad olid järgmised:

1. 12. märts 2020
2. 19. märts 2020
3. 30. märts 2020
4. 07. aprill 2020

Järgnevate kvaliteedi näitajate analüüsis on proovid nummerdatud 1-4 mainitud järjekorra järgi, v.a osas 3.1 ilm.

3.1 Ilm

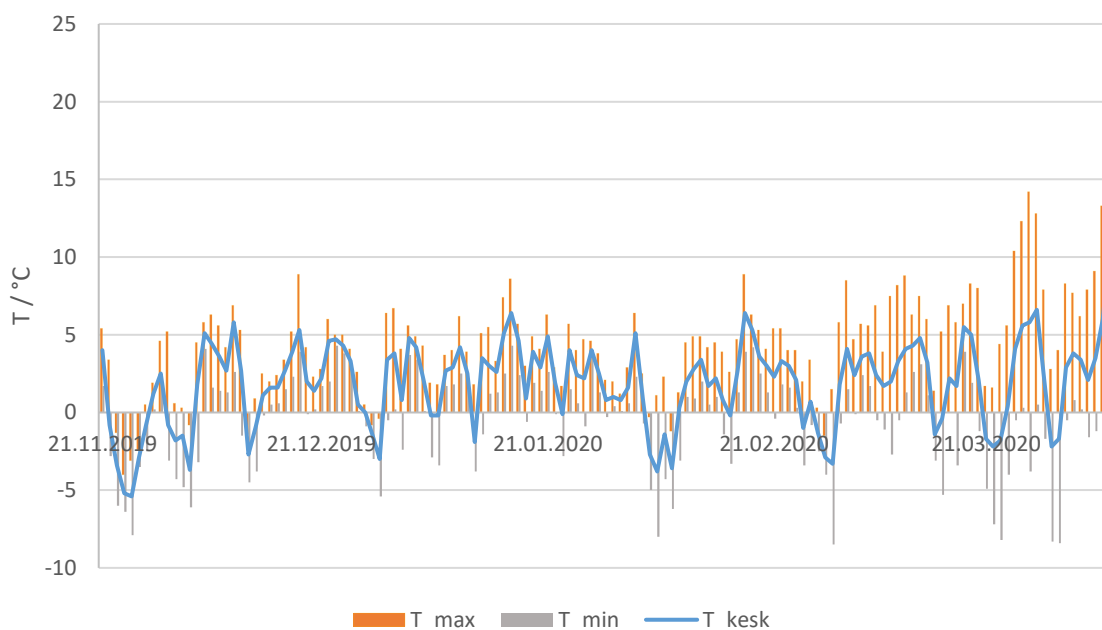
Aunastamise perioodiks oli 21.11.2019, kui alustati auna esimest otsa, kuni 07.04.2020, kui aunast võeti viimane proov enne kütuse täielikku katlamajja suunamist. Ilma vaatluse periood on lihtsustatult detsember 2019 kuni märts 2020. Ilmaandmed on pärit Varale lähimast ilmajaamast, Tartu-Tõravere ilmajaamast. See asub Vara Saeveskist 37 km kaugusel.

Näitajaid mõõdeti automaatjaamaga, mis registreerivad näidud tunniajalise vahega. Sademete hulk väljendab vedela veekihi paksust, mis tekiks sademetest pinnale, eeldusel, et sealt ei toimu aurumist ega imbumist pinnasesse. [27] 1 mm väljendab sademete mahtu 1 liiter 1 m² suurusel alal [28]. Perioodi andmete erinevust üldisest trendist hinnatakse kõrvalekaldega kliimanormist ehk anomaaliaga. Kliimanormid ehk pikaajalised keskmised arvutatakse konkreetsete vaatlusjaamade teatud pikkusega

andmerea põhjal. Andmerea ajaline pikkus on kokkuleppeline, ülemaailmselt on standardiks kujunenud kolmekümne aasta pikkused andmerekad. Eestis kehtivad normid on aastate 1981-2010 ilmastikuandmete põhjal. [29]

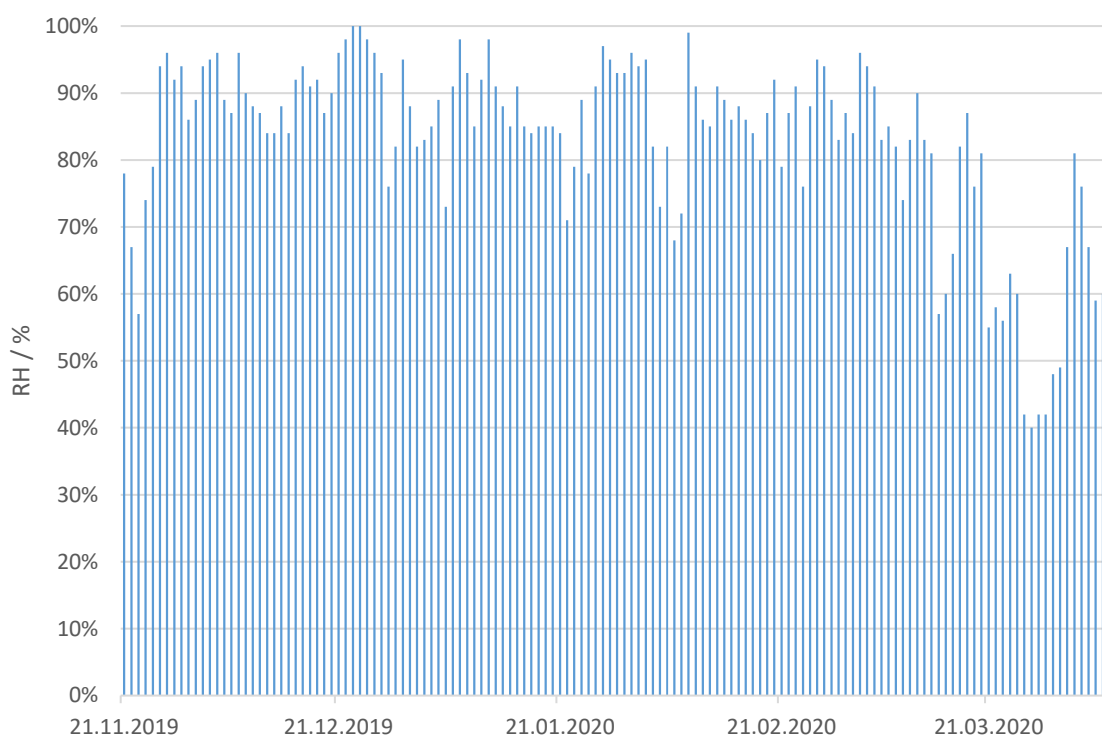
Vaadeldud perioodi ilm oli kliimanormist soojem (norm $-2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, mõõdetud $2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$) ja ka sademeterohkem (norm 178 mm , mõõdetud $181,2\text{ mm}$). Keskmine tuule kiirus oli 3 m/s . Tuuliseim oli jaanuarikuu. Päikesevalgust oli üle normi – Eesti norm on $239,3$ tundi, sellel ajal mõõdeti Tartu ilmajaamas aga $271,3$ tundi. Üle kahe kolmandiku sellest ajast paistis märtsis. Ilm oli lumevaene, soe ja vesine, leidis ka udu ja rohkelt tormi. [30] Lund tuli veebruari lõpus Lõuna-Eestis $5\text{-}15\text{ cm}$. [31] 2020. aasta talv oli kõige soojem alates 1961. aastast. [32]

Keskmine õhutemperatuur kõikus nulltelje ümber, olles enamus ajast positiivne. Kevade lähenedes tõusis keskmine temperatuur ning aprilli alguses saabus kiirelt soe ilm. Relatiivne õhuniiskus oli talve vältel 100% juures, kuid kukkus kiirelt kevade saabumisega. Samuti päevase päikesevalguse hulk tõusis hüppeliselt kevade saabumisega. Sademetel ja tuule kiirustel puudus kindel trend. Ilmaandmed on välja toodud joonistel 3.1 – 3.5.



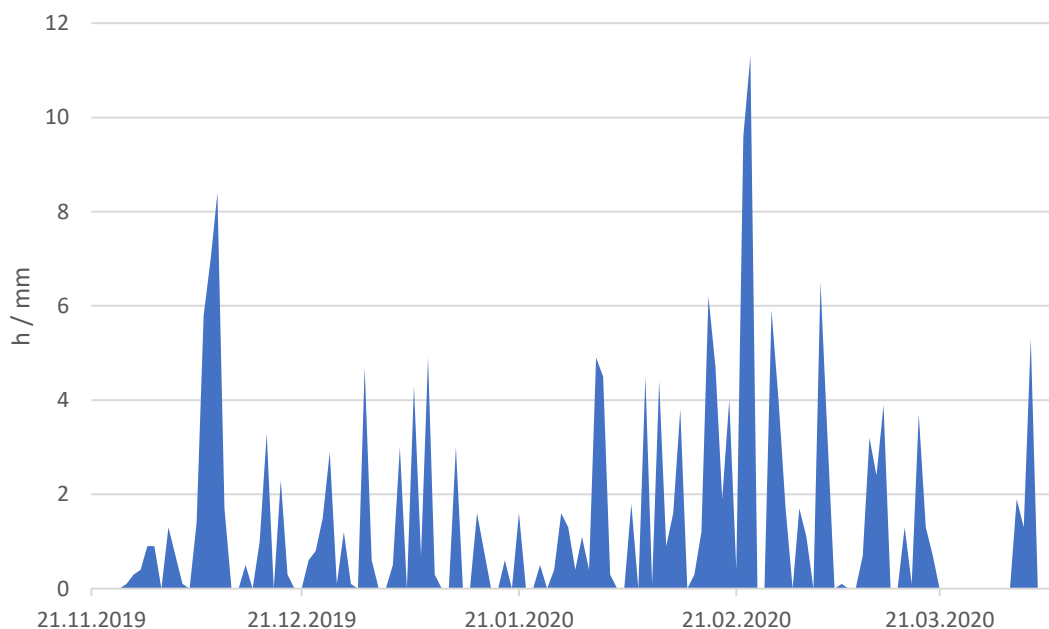
Joonis 3.1 Välisõhu temperatuuri jaotus Tartu-Tõravere ilmajaama andmetel [32]

T_{\max} – kõrgeim temperatuur päeva jooksul, T_{\min} – madalaim temperatuur päeva jooksul, T_{kesk} – päeva keskmine temperatuur.



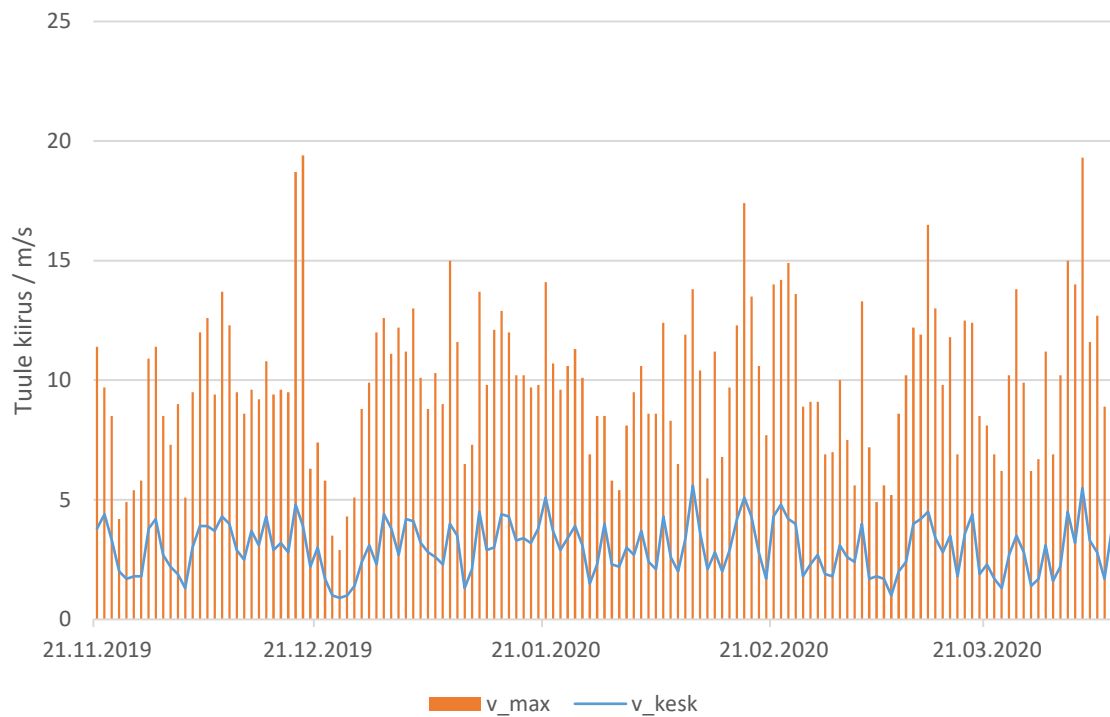
Joonis 3.2 Suhtelise õhuniiskuse jaotus Tartu-Tõravere ilmajaama andmetel [32]

RH – relative humidity ehk suhteline õhuniiskus, $RH = p_{H_2O} / p^*_{H_2O}$, väljendatud protsentides.
 p_{H_2O} – vee aururõhk, $p^*_{H_2O}$ – küllastatud auru rõhk



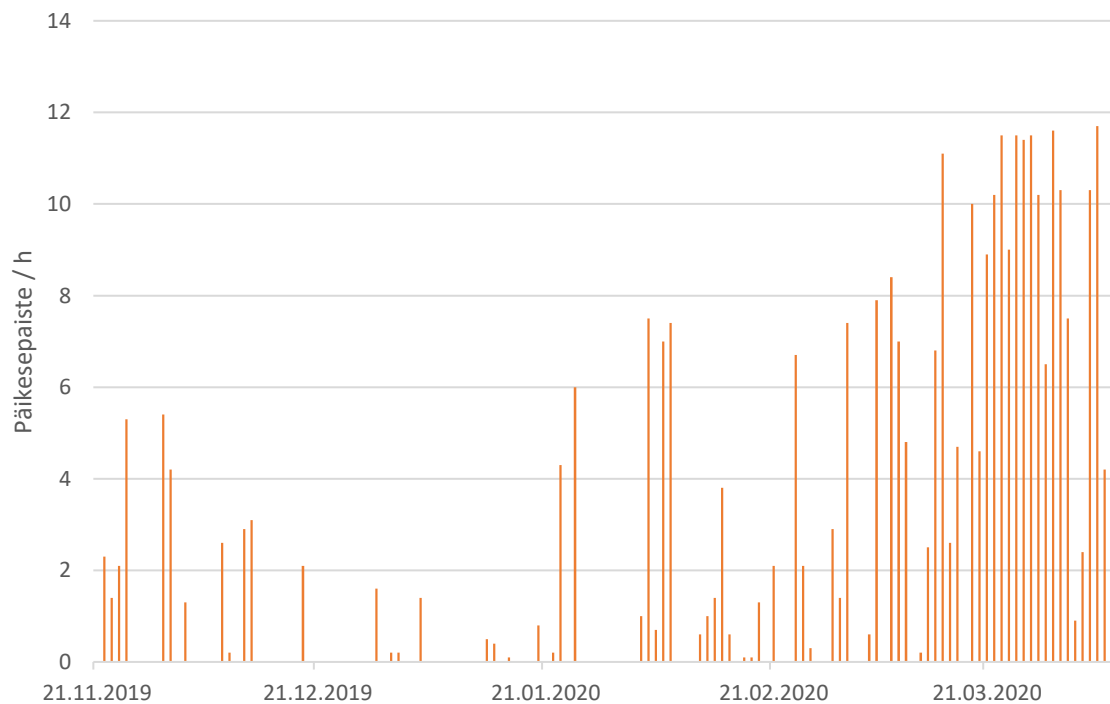
Joonis 3.3 Sademete hulga jaotus Tartu-Tõravere ilmajaama andmetel [32]

h – sademete samba kõrgus.



Joonis 3.4 Tuule kiiruse jaotus Tartu-Tõravere ilmajaama andmetel [32]

v_max – suurim tuule kiirus, v_ kesk – keskmine tuule kiirus.



Joonis 3.5 Päikesepaiste kestvuse jaotus Tartu-Tõravere ilmajaama andmetel [32]

3.2 Veebruari aun

Tabel 3.1 Veebruari auna algproovi mõõdetud suurused

Parameeter	Väärtus	Ühik
Niiskus	64,33 ± 0,80	%wb
Tuha sisaldus kuivaines	3,5 ± 0,15	%wb
Kuivaine ülemine kütteväärtus	19,99	MJ/kg
Kuivaine alumine kütteväärtus	18,69	MJ/kg
Tarbimisaine alumine kütteväärtus	5,10	MJ/kg

Veebruarikuu auna proov võeti 19.02.2020. Kütuse parameetrid, mis on esitatud tabelis 3.1, langevad kokku kirjanduse andmetega keskmisest koorekütusest. Osakeste jaotus on väga selgelt suuremate fraktsioonide poole kaldu, nagu on näha tabelist 3.2. Suuremate fraktsioonide hulk viitab, et järgneva kolmekuise aunastamise perioodi jooksul, ei pruugi toimuda väga suurt soojenemist ega lagunemist, kuna puudub piisavalt pinda ja väiksemate fraktsioonide hõõrdumisest tekkivat soojusenergiat, et luua soodne keskkond mikroorganismide kiireks kasvuks.

Suurim osake oli pikkusega 200 mm. Interpoleerimise kaudu leiti osakese mediaansuurus d_{50} , s.o. osake, millest on sama palju suuremat ja väiksemat materjali. Proovi mediaansuuruseks oli 103 mm.

Tabel 3.2 Osakeste jaotus veebruari aunas

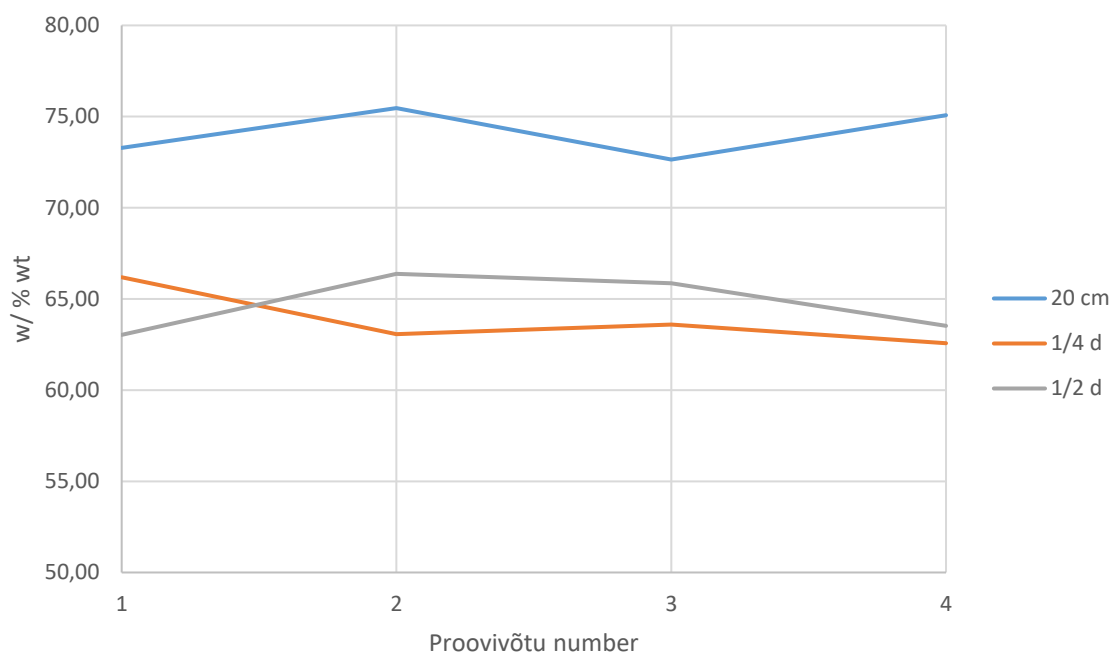
Sõel d / mm	Osakaal %
>= 80	62,08
>= 50	12,45
>= 20	14,52
>= 15	4,59
>= 10	2,44
>= 5	1,84
>= 3,15	0,41
>= 2,80	0,03
>= 2,00	0,24
>= 1,40	0,36
>= 1,00	0,29
>= 0,5	0,43
>= 0,25	0,20
< 0,25	0,11

3.3 Niiskus

Väljas asuva auna puhul toimub kuivamiseks vajalik soojuse ülekanne nii konvektiivselt soojade õhuvoogudega, radiatiivselt päikeselt kui ka vähesel määral konduktiivselt pinnase kaudu. Meeles tuleb pidada, et kuivamist ei toimu suure õhuniiskuse korral. Suur õhuniiskus oli talve alguses, kui aun oli just püsti seatud. Sellel ajal oli ka enim sademeid.

Tabel 3.3 Niiskusesisaldus proovide lõikes

Sügavus	Niiskus <i>W / %wb</i>											
	1			2			3			4		
20 cm	73,29	±	1,13	75,47	±	0,46	72,64	±	0,67	75,08	±	0,92
¼ d	66,19	±	2,20	63,07	±	0,78	63,60	±	0,40	62,57	±	1,91
½ d	63,03	±	0,36	66,38	±	0,45	65,86	±	1,38	63,53	±	0,67
Keskmine	67,50	±	5,25	68,30	±	6,42	67,37	±	4,71	67,06	±	6,96



Joonis 3.6 Niiskuse muutus eri sügavustel

Jooniselt 3.6 ja tabelist 3.3 on näha, et niiskus ei kõikunud suurel määral kuu aja jooksul. Suurim niiskus oli välimises kihil, kuna see on kõige rohkem mõjutatud ilmast ja välisniiskusest. Sellist niiskuse jaotust põhjustab ka korstnaefektist, kui vaba konvektsiooni tõttu kantakse niiskus väliskihitidesse.

Eeldustest erinevalt oli kõige kuivem keskmine kiht, mis võeti ¼ diameetri pealt, kuid ka kõige sisemise kihi väärtused sellest palju ei erinenud. Kahe sisemise kihi keskmine erinevus oli 3 protsendipunkti mõõtmiste alguses, kuid langes ühe protsendipunkti.

Mõõtmiste standardhälbed jäid 1,3 ja 1,6 vahele ja ka graafikult on selge, et ei toimunud suurt kõikumist. Paralleelide standardhälbed jäid enamasti vahemikku 0,4 – 1,3 %wb, välja arvatud kahel mõõtmisel, kus nad olid kahe protsendi kandis. See näitab materjali üldist homogeensust niiskuse jaotamisel.

Ilmaandmete baasil oleks materjal võinud olla kuivem, kuna proovivõttude aega (märts kuni aprill) iseloomustas madal suhteline õhuniiskus, vähesed sademed, keskmine tuulisus ja rohke päikesevalgus. Kõik need tegurid soodustavad materjali niiskussisalduse langemist.

3.4 Sõelanalüüs

Sõelanalüüs teostati ainult 12. märtsi ehk esimesele proovile, eeldusega, et osakeste jaotus eri sügavustel on kuhjas homogeenne.

Tabel 3.4 Osakeste jaotus eri sügavustel

Sõel <i>d / mm</i>	Osakaal, 20 cm %	Osakaal, ¼ d %	Osakaal, ½ d %
>= 80	8,28	0,73	1,66
>= 50	7,48	5,49	6,88
>= 20	23,37	14,68	21,13
>= 15	24,03	20,44	18,57
>= 10	12,17	20,63	16,63
>= 5	14,15	18,20	17,40
>= 3,15	2,88	3,91	0,42
>= 2,80	0,09	0,10	0,18
>= 2,00	1,56	2,53	2,67
>= 1,40	2,35	3,98	4,20
>= 1,00	1,49	2,92	3,18
>= 0,5	1,56	4,08	4,31
>= 0,25	0,45	1,63	1,90
< 0,25	0,13	0,68	0,87

Tabelist 3.4 on näha, et peenemate fraktsioonide, alates 2,80 mm, osatähtsus proovis kasvas aunas sissepoole minekul, mis kinnitab, et puidu lagunemine on intensiivsem auna sees. Üldiselt on poole diameetri ja veerandi diameetri proovid lähedasemad kui 20 cm sügavuselt võetud. Drastiliselt kahanes suurima fraktsiooni osakaal, kuid see on põhjustatud ka ebasümmeetrilisest osakeste kujust. Suuremad fraktsioonid olid pikkade kooreribadena, millel on kerge pikkupidi sõelast läbi minna.

Mediaansuurused d_{50} leiti interpoleerimise kaudu. 20 cm sügavusel oli selle suuruseks 18 mm, $\frac{1}{4}$ d sügavusel 13 mm ja $\frac{1}{2}$ d sügavusel 14 mm.

Mediaansuurused näitavad, et lagunemine on intensiivsem kuhiku sees ning nagu ka muude näitajate puhul, on sisemised kihid suhteliselt sarnased. Kui võtta eelduseks, et algsel materjalil oli sarnane osakeste jaotus kui veebruari aunal, tähendaks see mediaansuuruse ligi 7 kordset vähenemist kolmekuise lagunemise tõttu.

3.5 Tuhk

Tuhasuse määramine oli keerukas, kuna paralleelide tulemused läksid kas ühte või teise vahemikku. See viitab proovi ebahomogeensusele. Ebapiisava täpsuse tõttu said need katsetulemused välja võetud.

Tabeli 3.5 põhjal on näha, et välimise kihi tuhasisaldus oli suurim, jäädes keskmiselt 4% kanti. Neljandiku ja poole diameetri pealt võetud proovid olid jällegi väga sarnased, erinedes lähimal juhul ainult 0,05 protsendipunkti.

Kihtide keskmiste suhtelised hälbed jäävad 8% kanti, mis kinnitab, et auna sees kihtide löikes tuhasus ei muutu palju. Kogu auna ja mõõtmisperioodide keskmine on 3,64%, mis langeb kirjanduse analüüsil leitud ühte vahemikku. Mõõtetud tuhasisaldused on kirjanduse andmetel tuhasisalduse vahemiku ülaosas ja üle selle.

Tabel 3.5 Kütuse tuhasisaldus

Sügavus	Tuhasisaldus A / %											
	1			2			3			4		
20 cm	4,04	±	0,12	3,68	±	0,92	4,05	±	0,06	3,97	±	0,04
$\frac{1}{4}$ d	3,54	±	0,08	3,79	±	0,20	3,35	±	0,21	3,35	±	0,04
$\frac{1}{2}$ d	3,76	±	0,22	3,21	±	0,15	3,31	±	0,12	3,66	±	0,35
Keskmine	3,78	±	0,25	3,56	±	0,31	3,57	±	0,42	3,66	±	0,31

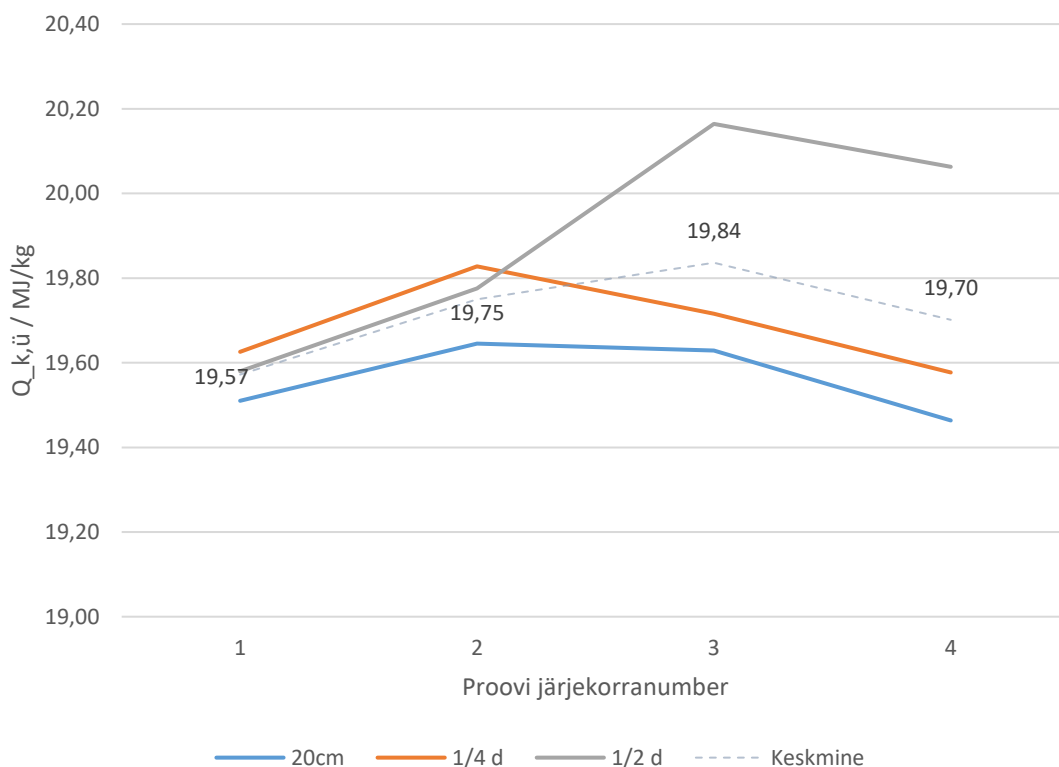
3.6 Kütteväärtus

Kütteväärtuste vaatepunktist olid proovid homogeensed. Kõik kütteväärtuste paralleelkatsed olid vahega 4-65 J/g, mis viitab, arvestades aktsepteeritavat korratavust 140 J/g, materjali koostise stabiilsusele ja ühtlusele.

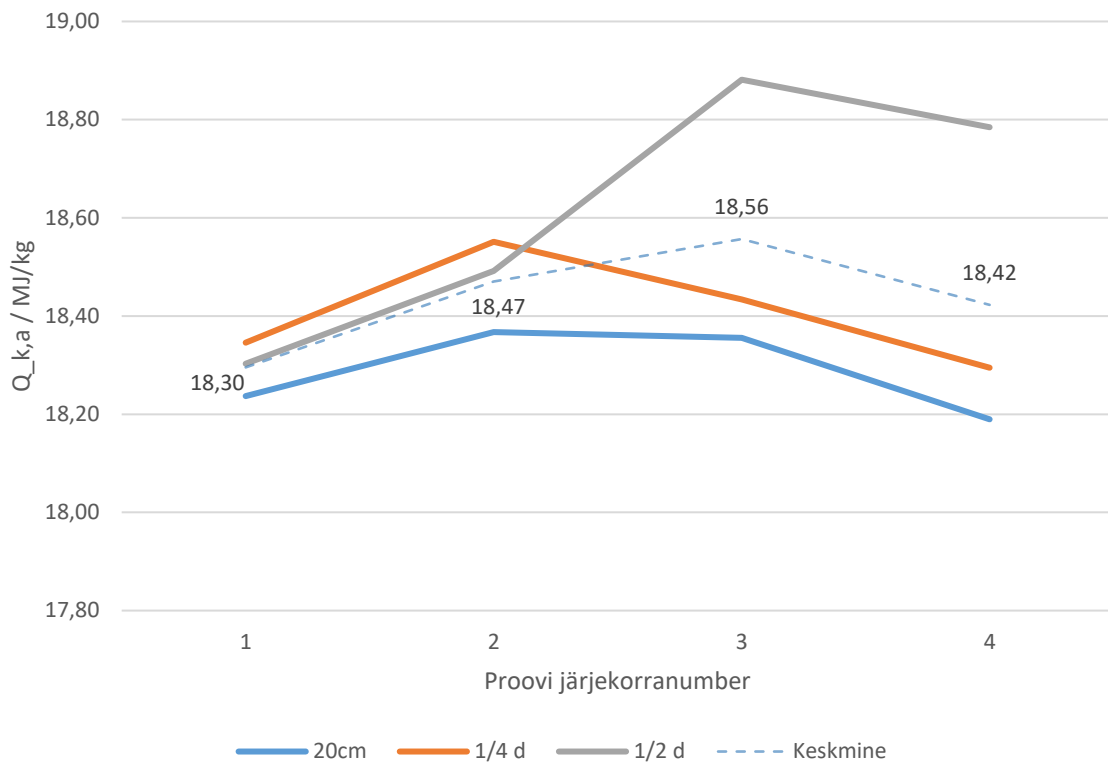
Joonistelt 3.7 kuni 3.9 on näha, et kuu aja jooksul ei muutnud oluliselt koore kütteväärtus. Standardhälbed jäid iga kihi puhul vahemikku 0,1-0,3. Mõõtmiskordade standardhälbed ehk kütteväärtuse erinevus auna eri sügavustes oli suurim tarbimisaine alumise kütteväärtuse puhul. Mõõtmiste lahknevused läksid suuremaks auna lõpuosas.

Joonistelt ja keskmiste arvutamisel tõuseb ka esile niiskuse märkimisväärne mõju kütuse kütteväärtusele. Kihtide keskmisteks kütteväärtusteks olid $Q_{k,ü} = 19,71$ MJ/kg, $Q_{k,a} = 18,44$ MJ/kg ja $Q_{t,a} = 4,33$ MJ/kg. Tarbimisaine ja kuivaine alumise kütteväärtuse vahe on 14,11 MJ/kg ehk kuivaine kütteväärtus on kahanenud ligi 77%. Kuivaine kütteväärtuste jaotusel pole see märgatav, aga tarbimisaine väärtuste diagrammilt on näha, kui suurt rolli mängib see, kas niiskus on 65 %wb nagu välimisel kihil või 75 %wb nagu sisemistel kihtidel, sest kütusest ruumala ühiku kohta kättesaadav energia väheneb vee aurustamise soojuse arvelt.

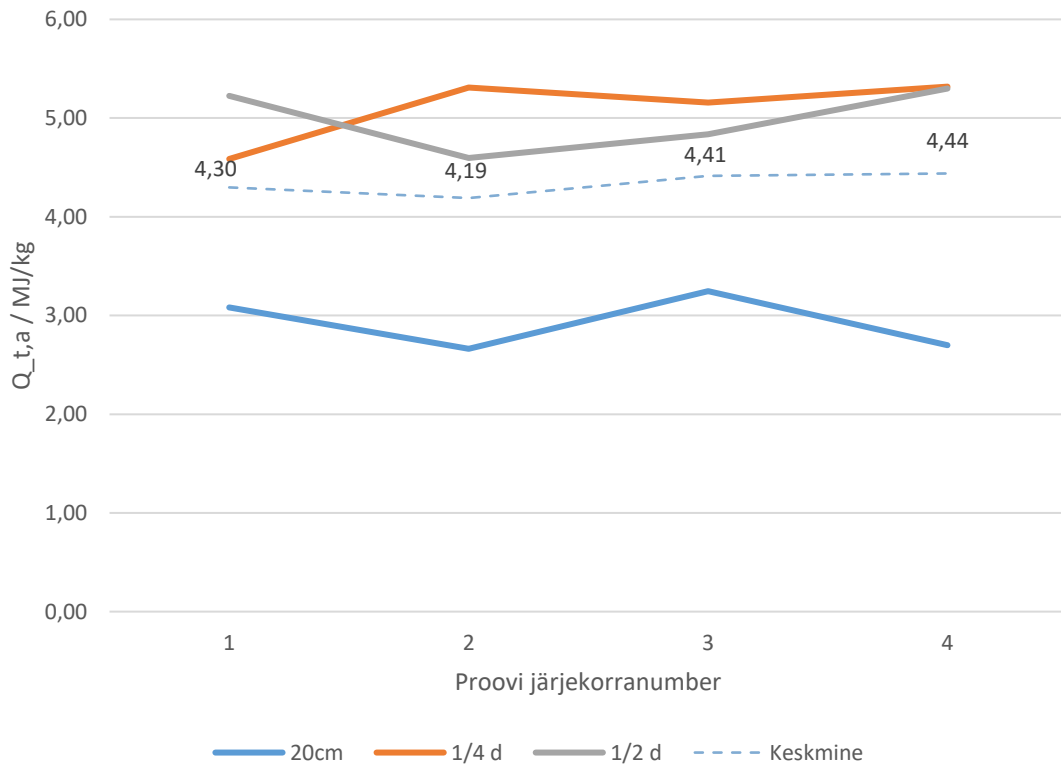
Kuivaine kütteväärtused ühtivad kirjanduses esitatuga.



Joonis 3.7 Kuivaine ülemise kütteväärtuse muutus



Joonis 3.8 Kuivaine alumise kütteväärtuse muutus



Joonis 3.9 Tarbimisaine alumise kütteväärtuse muutus

3.7 Kuivati arvutus

Vara Saeveski torustikele sobiks 61/40 või 90/40 süsteemid. Esimene number väljendab pealevoolu temperatuuri ja teine äravoolu temperatuuri. 61/40 süsteem ei annaks piisavat kuivatusvõimsust, seetõttu on arvutus 90/40 kuivatisüsteemile.

Suitsugaaside kondensaatoris ehk pesuris kondenseeritakse veeaur. Mahajahutatud suitsugaasid liiguvad läbi korstna atmosfääri. Jahutusvee temperatuur tõstetakse selle soojuse abil 61°C-ni ning suunatakse katlamaja kolmikusse, kus see soojendatakse 90°C-ni ning suunatakse kuivatisse. Kuivatis annab ta oma soojuse õhule, mis suunatakse kuivatisse materjali niiskussisalduse vähendamiseks umbes 50%-ni. Peale õhu soojendamist on vee temperatuur 40°C ning see suunatakse uuesti pesurisse. Pesur annaks soojust nii kontori, tootmishoone kui ka kuivati tarbeks.

Kuivati arvutamise jaoks kasutati valemeid 3.1 kuni 3.7.

$$\dot{V} = \frac{\alpha V}{t} \quad (3.1)$$

kus \dot{V} , mahtkulu, m³/h
 V , hulk, pm³
 α , puukoore kordaja, m³/pm³
 t , aeg, h

$$\dot{m} = \dot{V} \rho \quad (3.2)$$

kus \dot{m} , masskulu, kg/h
 ρ , tihedus, kg/m³

$$q = \dot{m}_w \cdot q_{eri} \quad (3.3)$$

kus q , kuivati soojusvõimsus, kW
 \dot{m}_w , vee masskulu, kg/h
 q_{eri} , eritarbimine, kWh/kg

$$\dot{m}_{w,kuiv} = \frac{q}{c_{p,vesi} \cdot \Delta T} \quad (3.4)$$

kus $\dot{m}_{w,kuiv}$, kuivati vee masskulu, kg/h
 ΔT , temperatuuride vahe, K
 $c_{p,vesi}$ vee soojusmahtuvus, $c_{p,vesi} = 4,2 \frac{kJ}{kg K}$

$$q = c_{p,vesi} \cdot \dot{m}_{w,kuiv} \cdot \Delta T \quad (3.5)$$

$$q_{lisa} = \Delta Q_{t,a} \cdot \rho \cdot (1 - \Delta W_{\%}) \cdot V \cdot \frac{1}{3600} \quad (3.6)$$

kus q_{lisa} , kuivatusest võidetav energia, MWh

$\Delta Q_{t,a}$, alumiste kütteväärtuse vahe, MJ/kg

$\Delta W_{\%}$, niiskussisalduste protsendiline erinevus, %

V , kütuse hulk aastas, m³

$\frac{1}{3600}$, teisendustegur, MJ → MWh

$$P = \frac{p_{el}}{1000} \cdot V \quad (3.7)$$

kus P , elektrienergia tarve aastas, MWh

p_{el} , elektriline võimsus, kW

Arvutus viidi läbi MS Office Exceli mudeli abil. Vahetulemused on toodud välja tabelis 3.6. Tabelist tuleb välja, et Vara Saeveskis aastas tekkiva 42000 pm³ materjali kuivatamiseks 70 %wb kuni 50 %wb on tarvis aastas 2782 MWh ning kütuse kuivatamiseks võidetakse 4267 MWh energiat. Süsteemi kasutegur on 92%, seega kuivatusest saadav täiendav energia on 8% madalam kuivatuseks kulutatud energiast. Ülejäänud soojus, mis säästetakse kuivatamisel, kulub materjali soojendamiseks, kuivati ja muudeks soojuskadudeks. Oma rolli mängivad tulemuste kujundamisel ka tehtud lihtsustused. Kuivati aastane elektritarve oleks 187 MWh, mis tekitaks saeveskile aastas ligi 9400 € väljamineku, kuid kuivati kaotaks samas kuiva kütuse sisseostmise vajaduse. 300 000 € investeeringu puhul kuivatisse oleks tasuvusaeg 7 aastat ja 5 kuud. Täiendav mitterahaline sääst tuleb ka katla ja kondensaatori töö optimeerimisest.

Tabel 3.6 Lihtsustatud kuivatiarvutus

Näitaja	Väärtus	Ühik	Allikas, märkused
<i>Puukoorte kordaja, a</i>	0,4	m ³ /pm ³	Kogemuslik
<i>Puukoorte hulk, V</i>	42000	pm ³	[13]
<i>Puukoorte hulk, V</i>	16800	m ³	Valem 3.1
<i>Töötunde, t</i>	4160	h	Aastas
<i>Puukoore kulu, ṽ</i>	4,04	m ³ /h	Valem 3.1
<i>Tihedus (W=70%)</i>	420	kg/m ³	Vara Saeveski poolt varem tellitud analüüsi andmetel
<i>Kuivatatav kogus, ṁ</i>	1696	kg/h	Valem 3.2
<i>Niiskus enne, W_{alg}</i>	0,70	%	Katsete baasil (osa 3.3 niiskus)
<i>Niiskus pärast, W_{lõpp}</i>	0,5	%	
<i>Niiskusesisaldus kuivainest, ΔW_%</i>	0,3	%	

Tabeli 3.6 Lihtsustatud kuivatiarvutus järg

<i>Eemaldatava vee kogus, \dot{m}_w</i>	485	kg/h	
<i>Kuivaine kogus, \dot{m}_k</i>	1212	kg/h	
<i>Eritarbimine, q_{eri}</i>	1,38	kWh/kg	Eeldus allika [9] baasil
<i>Kuivati soojuse tarve, q_{kuiv}</i>	669	kW	Valem 3.3
<i>Kuivatite soojuse tarve aastas, $q_{A,kuiv}$</i>	2782	MWh	Aasta töötundide kohta
<i>Kuivatite tagasivool, T_{tv}</i>	40	°C	
<i>Suitsugaaside kondensaatori temp, T_{kond}</i>	61	°C	
<i>Kuivatite pealevool, T_{pv}</i>	90	°C	
<i>Kuivati vee kogus</i>	3,18	kg/s	Valem 3.4, $\Delta T = T_{pv} - T_{tv}$
<i>Suitsugaaside kondensaatori tarve</i>	281	kW	Valem 3.5, $\Delta T = T_{kond} - T_{tv}$
<i>Katla soojuse tarve</i>	388	kW	Valem 3.5, $\Delta T = T_{pv} - T_{kond}$
<i>Soojusvõimsus kokku</i>	669	kW	Katla ja kondensaatori soojustarvete summa
<i>Katlamaja soojuse tarve</i>	1614	MWh	Aasta kohta
<i>Katla kasutegur</i>	0,86		Vara Saeveski uue katla nõutud minimaalne kasutegur
<i>Korrigeeritud katla soojuse tarve, $q_{A,katel}$</i>	1876	kW	
<i>Soojuse tarve kokku, q_{sum}</i>	4396	MWh	$q_{A,katel} + q_{A,kuiv}$
<i>Alumine kütteväärtus $Q_{t,a,W=70\%}$</i>	4,2	MJ/kg	Vara Saeveski poolt varem tellitud analüüsi andmetel
<i>Alumine kütteväärtus $Q_{t,a,W=50\%}$</i>	8,2	MJ/kg	[1]
<i>Tihedus (W=50%)</i>	320	kg/m ³	[1]
<i>Kuivatusest saadav täiendav energia, q_{lisa}</i>	4267	MWh	Valem 3.6
<i>Kasutegur</i>	92	%	$q_{lisa} / q_{sum} * 100\%$
<i>Elektriline võimsus, p_{el}</i>	45	kW	
<i>Elektrienergia tarve, P</i>	187	MWh	Valem 3.7
<i>Elektrienergia hind</i>	50	€/MWh	[33]
<i>Kulu elektrile aastas</i>	9 360	€/a	
<i>Investeering</i>	300 000	€	Pakkumise järgi
<i>Sisse ostetud kuiva kütuse kulu</i>	50 000	€/a	Niiske kütusega segamiseks, et tekiks sobiv niiskusesisaldus
<i>Sääst peale kulu</i>	40 640	€/a	Elektrile kuluva raha ja sisse ostetud kütuse kulu vahe
<i>Lihttasuvusaeg</i>	7,4	a	

KOKKUVÕTE

Kuusekoorest kütus on energeetilistel eesmärkidel kasutatav puidutöötlemise jääde. Kütust võib hoiustada aunades ehk piklikutes hunnikutes, et tagada katlajaama sujuv töö aasta läbi. Auna võib hoiustada nii väljas, katte all või siseruumides. Seismisel käivituvad aunas bioloogilised protsessid, mis oleneb osakeste suurusest, ilmastikust, niiskussisaldusest ja ventilatsioonist. Peamised bioloogilised lagundajad on seened ja bakterid. Bioloogiliste protsesside tõttu tõuseb aunas ka temperatuur ja aun hakkab seestpoolt kuivama. Nii on võimalik iseeneslikult saavutada niiskusesisaldus kuni 35 %wb. Temperatuuri tõusu ja vähese niiskussisalduse puhul võib tekkida isesüttimine. Väljas hoiustamist iseloomustab veel kuivaine kadu, tuhasisalduse kasv ja kütteväärtuse langus.

Kütuse kvaliteedi langemise ja isesüttimise vältimiseks hoiustamisel võiks kütust kuivatada. Alla 23 %wb niiskussisaldus pärsib oluliselt laguprotsesside levikut. Koore kuivatamiseks on eelistatud trummelkuivati ja pneumokuivati, kuid võimalik on ka kasutada lint- või torukuivatit. Enne kuivati valimist tuleb teha põhjalik majanduslik analüüs. Kuivatamisel tuleks eelistada madalamaid temperatuure, et minimeerida lenduvate orgaaniliste ainete mõju ja puidu termilist lagunemist. Kütuse kuivusaste on oluline, kuna mida madalam on kütuse niiskuse sisaldus, seda suurem on kättesaadav energia massiühiku kohta.

Praktilises osas uuriti kahte kuusekoore talvist auna, millest üks oli seisnud kolm kuud ja teine alles ladustamisel. Proovid võeti seisnud aunast kuu aja jooksul kolmelt sügavuselt. Seisnud aunal oli osakeste jaotuses oluliselt suurem peene fraktsiooni osakaal.

Kõik näitajad kõikusid vähesel määral kuu aja jooksul, kuid mitte piisavalt, et leida seaduspärasust. Kahe sisemise kihi näitajad (osakeste jaotus, niiskus, tuhasus, kütteväärtus) olid sarnased. Välimine kütusekiht olid sisemist osast alati kehvema kvaliteediga, olles niiskem (keskmiselt 15,3 %), suurema tuhasisaldusega (12 % tuhasem) ja madalama tarbimisaine kütteväärtusega (42 % madalam tarbimisaine puhul, kuivaine puhul 1,2 %).

Lihtsustatud 90/40 kuivati arvutusest tuli välja, et kuivati kasutegur oleks 92 % ja lihttasuvusaeg oleks 7,4 aastat. Sellega kaasneks veel mittetäiendav rahaline sääst katlajaama töö optimeerimisel.

Kirjanduse põhjal võiks kasutada puukoore kuivatamiseks ka lint-, toru- või pneumokuivatit. Kuivati tehnilis-majandusliku analüüsi on võimalik magistritööna edasi arendada. Aunastamise analüüsi samuti – võimalik on näitajate analüüs teha kogu aunastamisperioodi ulatuses nii suve- kui ka talveperioodil. Samuti võib mõõta aunakatete mõju ladustatud kütuse kütteväärtusele ja muudele huvipakkuvatele näitajatele. Aunas toimuvate protsesside paremaks mõistmiseks on võimalik kasutada termopaari temperatuuri analüüsimiseks.

CONCLUSION

Spruce bark fuel is forestry residue used for the purpose of producing heat and electricity. The fuel can be stored in piles, to assure fail-safe operation of the heat plant. These piles can be stored outside, under cover, or indoors. During storage, biological processes begin to take place inside the pile, the intensity of which depends on particle size distribution, weather, size of the pile, moisture content, and ventilation. The main sources for wood decay are different species of fungi and bacteria. Due to biological processes, a rise in temperature occurs in the pile and moisture content in the inner layers falls, sometimes reaching as low as 35%wb. If the temperature has risen significantly and the pile is too dry, self-combustion can occur. Other effects of outside storage are also dry matter loss, rise of ash content, and fall of calorific value.

To avoid the descent of fuel quality and self-combustion, fuel could be dried. The decomposition processes are considerably slowed when the moisture content of fuel is kept under 23%wb. For effective drying of bark, a rotary dryer or pneumatic dryer is recommended, but it is also favourable to use a band dryer. Before investing into a dryer system, however, a thorough economic analysis should be undertaken. Drying should be done on low temperatures to minimize any effects of volatile organic compounds and thermal decomposition of wood. Moisture content is important since it is directly tied to the amount of energy available from one kg of fuel.

In the practical part, two outdoors storage piles of spruce bark were analysed. One had stood outside for three months and the other was just in the beginning of storage period. The samples were taken from three different depths for one month. The older fuel pile had a higher distribution of fine particles.

All quality indicators varied during the month, but not enough to make sense of a concrete trend. The indicators of two inner layers of the pile were similar in terms of calorific value, water content, ash content, and size distribution. The outside layer was of much worse quality, being wetter by 15,2 %, with a higher ash content by 12 %, and a lower net calorific value on wet matter basis by 42 %.

Simplified 90/40 dryer calculation showed that dryer efficiency would be 92 % and payback period 7,4 years. Beside dryer, there would be extra non-monetary benefits from optimizing the plant.

Based on literature review, both a band and pneumatic dryer could be used to dry bark fuel. Fuel quality analysis could also be done during the whole time, in both winter and summer. Further analysis could also compare the effects of different storage covers. Beforementioned was not included in this work due to the need for substantial analysis.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] J. Koppejan ja S. van Loo, Toim, *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. UK: Earthscan, 2008.
- [2] A. Eriksson, „Energy efficient storage of biomass at Vattenfall heat and power plants“, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, 2011.
- [3] V. Vares, Ü. Kask, P. Muiste, T. Pihu, ja S. Soosaar, *Biokütuse kasutaja käsiraamat*. TTÜ kirjastus, 2005.
- [4] „ELEKTRIJAAAMADE TOODANG JA ENERGIA TOOTMISEKS TARBITUD KÜTUS“, *Statistikaamet*. http://pub.stat.ee/px-web.2001/Dialog/varval.asp?ma=KE033&ti=ELEKTRIJAAAMADE+TOODANG+JA+ENERGIA+TOOTMISEKS+TARBITUD+K%DCTUS&path=./Database/Majandus/02Energeetika/02Energia_tarbimine_ja_tootmine/01Aastastatistika/&lang=2 (vaadatud mai 16, 2020).
- [5] I. Wästerlund, P. Nilsson, ja R. Gref, „Influence of storage on properties of wood chip material“, *J. For. Sci.*, kd 63, nr 2017, lk 182–191, doi: 10.17221/46/2016-JFS.
- [6] P. Kovařík, „Drying of biomass with high water content“, Magistritöö, Czech Technical University in Prague, Praha, 2017.
- [7] M. Codina ja I. Lopez, „Drying of Wood-Forest Chips“, *Technical backgrounds for advanced techniques and technologies in biomass production*, BiomassTradeCentreII project, Intelligent Energy Europe, 2012, lk 166–190.
- [8] L. Fagernäs, J. Brammer, C. Wilén, M. Lauer, ja F. Verhoeff, „Drying of biomass for second generation synfuel production.“, *Biomass Bioenergy*, kd 34, nr 2010, lk 1267–1277, 2010.
- [9] A. Poobus ja T. Tiikma, *Kuivatustehnika*. Tallinn: TTÜ kirjastus, 2001.
- [10] C. J. Geankoplis, *Transport Processes and Separation Process Principles (Includes Unit Operations)*. US: Pearson Education Inc., 2003.
- [11] E. Anerud *et al.*, „Dry matter losses during biomass storage. Measures to minimize feedstock degradation.“ IEA Bioenergy, 2019.
- [12] K. Pilt, „Puidu biokahjustused“, 2013, [Online]. Available at: http://www.metsaselts.ee/failid/File/TeeMetsa%20materjalid/loeng%20P%C3%B5llu_majandusmuuseum.pdf.
- [13] „Vara Saeveski“, *Woodwell Grupp*. <https://woodwell.ee/vara-saeveski> (vaadatud mai 12, 2020).
- [14] „Riigihangete register. Vara Saeveski OÜ biokatlamaja rajamine.“, *Riigihangete register*. <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/728668/general-info> (vaadatud mai 25, 2020).

- [15] „OÜ Vara Saeveski ressursitõhususe investering“, *Keskkonnainvesteeringute Keskus*, juuli 28, 2018. <https://kik.ee/et/projekt/ou-vara-saeveski-ressursitohususe-investeering> (vaadatud mai 25, 2020).
- [16] I. Leitak ja A. Viitak, *Kvaliteedi tagamine analüütilises keemias*. Tallinn: TTÜ kirjastus, 2007.
- [17] „ISO 18135:2017. Solid Biofuels -- Sampling.“ International Organization for Standardization, 2017, [Online]. Available at: <https://www.evs.ee/et/iso-18135-2017>.
- [18] M. Anheller, „Biomass Losses during Short-term Storage of Bark and Recovered Wood“, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, 2009.
- [19] A. Paist ja A. Poobus, *Soojuseraatorid*. Tallinn: TTÜ kirjastus, 2009.
- [20] „Phyllis2 - Database for the physico-chemical composition of (treated) lignocellulosic biomass, micro- and macroalgae, various feedstocks for biogas production, biochar and torrefied biomass.“, *Phyllis2*. <https://phyllis.nl/> (vaadatud juuni 01, 2020).
- [21] „EVS-EN ISO 18125:2017. Solid biofuels - Determination of calorific value (ISO 18125:2017)“. International Organization for Standardization, 2017.
- [22] „ISO 18134-2:2017. Solid biofuels -- Determination of moisture content -- Oven dry method -- Part 2: Total moisture -- Simplified method.“ International Organization for Standardization, 2017.
- [23] „EVS-EN ISO 18134-3:2015. Solid biofuels - Determination of moisture content - Oven dry method - Part 3: Moisture in general analysis sample (ISO 18134-3:2015).“ International Organization for Standardization, 2015.
- [24] „ISO 17827-1:2016. Solid biofuels -- Determination of particle size distribution for uncompressed fuels -- Part 1: Oscillating screen method using sieves with apertures of 3,15 mm and above.“ International Organization for Standardization, 2016.
- [25] „ISO 17827-2:2016. Solid biofuels -- Determination of particle size distribution for uncompressed fuels -- Part 2: Vibrating screen method using sieves with aperture of 3,15 mm and below.“ International Organization for Standardization, 2016.
- [26] „ISO 18122:2015. Solid biofuels -- Determination of ash content.“ International Organization for Standardization, 2015.
- [27] „Ilm ja kliima | Keskkonnaagentuuri koduleht“. <https://www.keskkonnaagentuur.ee/et/eesmargid-tegevused/kov-keskkonnaspetsialisti-metoodiline-juhend/keskkonnaseisundi-indikaatorid/ilm> (vaadatud mai 12, 2020).
- [28] „Mõõtmised maapinnal. Sademed.“, *Riigi Ilmateenistus*. <http://www.ilmateenistus.ee/ilmatarkus/mootetehnika/mootmised-maapinnal/sademed/> (vaadatud mai 31, 2020).

- [29] Keskkonnaagentuur, „Talve Ülevaade 2019/2020“. <https://kaur.maps.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=d05b77776fb947afbedcb973b7dd995b> (vaadatud mai 12, 2020).
- [30] J. Kamenik, „Lõputu soojus ei anna asu“, *ILM.EE*, jaan 10, 2020. <https://ilm.ee/index.php?518232> (vaadatud mai 12, 2020).
- [31] E. Pedassaar, „Lõuna poolt lisandub värsket lund“, *ILM.EE*, veebr 27, 2020. <https://ilm.ee/?518313> (vaadatud mai 12, 2020).
- [32] „Riiklik Ilmateenistus. Vaatlusandmed. Ööpäevaandmed.“, *Riigi Ilmateenistus*. <http://www.ilmateenistus.ee/ilm/ilmavaatlused/vaatlusandmed/ooapaevaandmed/> (vaadatud mai 17, 2020).
- [33] „Elering Live“. <https://dashboard.elering.ee/> (vaadatud juuni 02, 2020).