



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
MEHAANIKATEADUSKOND

Soojustehnika instituut
Soojusenergeetika õppetool

MSE40LT

Rebeka Kukk

PÕHU KASUTAMINE ENERGIA TOOTMISEKS

Bakalaureusetöö

Autor taotleb
tehnikateaduste bakalaureuse
akadeemilist kraadi

Tallinn 2016

AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis Aadu Paistu juhendamisel

“.....” 2016.a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

“.....” 201...a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....” 201... a.

..... allkiri

TTÜ soojustehnika instituut

Soojusenergeetika õppetool

BAKALAUREUSETÖÖ ÜLESANNE

2016 aasta kevadsemester

Üliõpilane: Rebeka Kukk, 134590

Õppekava: MASB

Eriala: Soojusenergeetika

Juhendaja: professor, õppetooli juhataja, Aadu Paist

BAKALAUREUSETÖÖ TEEMA:

Põhu kasutamine energia tootmiseks

The use of straw for energy production

Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	Põhk põllumajanduses	09.05.2016
2.	Põhu põletustehnilised näitajad	13.05.2016
3.	Käitlus kütuseks ja vääristatud kütused	16.05.2016
4.	Põletustehnoloogiad	20.05.2016
5.	Heitme probleemid	20.05.2016

Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid:

.....

Täiendavad märkused ja nõuded:.....

Töö keel: eesti

Kaitsmistaoitus esitada hiljemalt 16.05.2016 **Töö esitamise tähtaeg:** 23.05.2016

Üliõpilane Rebeka Kukk /allkiri/ kuupäev.....

Juhendaja Aadu Paist /allkiri/ kuupäev.....

SISUKORD

AUTORIDEKLARATSIOON	2
BAKALAUREUSETÖÖ ÜLESANNE	3
SISUKORD	4
LÜHENDITE LOETELU	6
EESSÕNA	7
SISSEJUHATUS	8
2. PÕHK PÕLLUMAJANDUSES	9
2.1. TERAVILJA PÕHK	9
2.2. PÕHU RESSURSS NING SAAGIKUS	10
2.3. PÕHU KASUTAMINE ENERGEETIKAS	14
2.4. KONKUREERIVAD KASUTUSALAD	16
3. PÕHU PÕLETUSTEHNILISED NÄITAJAD	18
3.1. ELEMENTAARKOOSTIS	18
4. KÄITLUS KÜTUSEKS	20
4.1. PÕHU KORISTUS	20
4.2. TRANSPORTIMINE	21
4.3. LADUSTAMINE	22
5. VÄÄRISTATUD KÜTUSED	24
5.1. PÕHUPELLET NING PÕHUBRIKETT	24
6. PÕLETUSTEHTNOLOOGIAD	26
6.1. RESTKOLDEGA PÕLETUS	26
6.2. SIGAR-TÜÜPI PÕLETUS	27
6.3. KEEVKIHTPÕLETUS	28
6.4. PEENESTATUD PÕHU PÕLETUS	30
7. HEITME PROBLEEMID	32
7.1. SÜSINIKDIOKSIID	32
7.2. LÄMMASTIKOKSIIDID	32
7.3. VÄÄVELDIOKSIID	32
7.4. KLOOR	33
KOKKUVÕTE	34
THE USE OF STRAW FOR ENERGY PRODUCTION	34
SUMMARY	36
KASUTATUD KIRJANDUS	38

LÜHENDITE LOETELU

a - aasta

kg - kilogramm

ha - hektar

% - protsent

MW - megavatt

TJ - teradžaul

€ - euro

km-ta - käibemaksuta

nt - näiteks

MJ - megadžaul

dm³ - kuupdetsimeeter

CO - süsinikoksiid

NO_x - lämmastikoksiidid

SO_x - vääveloksiidid

NO - lämmastikoksiid

g - gramm

GJ - gigadžaul

nn - niinimetatud

EESSÕNA

Käesoleva töö teema on valitud Tallinna Tehnikaülikooli soojustehnika instituudi poolt etteantud teemade hulgast. Teema pakkus välja professor, õppetooli juhataja Aadu Paist, kes on ka antud töö juhendaja.

Materjali kogumisel oli abiks juhendaja prof. Aadu Paist. Enamus materjali on kogutud internetist, kuid on ka kasutatud taanlaste poolt kokku pandud raamatut, mis on puhtalt keskendunud põhust energia tootmisele.

Ühtlasi sooviks autor tänada töö juhendajat prof. Aadu Paistu.

1. SISSEJUHATUS

Eesti kuulub on oma pindalalt väikeste riikide hulka. Oma kliima tõttu, on Eestis soojuse tootmine väga tähtsal kohal. Keskmiseks temperatuuriks aastas loetakse + 5 kraadi. Talvekuudel jääb temperatuur alla 0 kraadi. Kütisperiood kestab umbes septembrist märtsi või aprillini.

Enamus elektritoodangust toimub Eestis kaevandatud maavarast- põlevkivist. Põlevkivi kaevandamine ning kasutamine toob kaasa keskkonna reostusi. Põlevkivi põletamisel tekib suurtes kogustes tuhka, kuid taaskasutatud tuhahulk jääb ligikaudu 5 % ulatusse. Kõige suuremat probleemi tekitab kaevandamisel vee reostamine. Kaevanduste kuivendamisel saavad kõvasti kahju põhja-ja pinnaveekihi, kuid kõige paremat joogivett saab toota just pealmistest veekihtidest. See tekitab omaette probleeme veepuhastus firmadele. Lisaks veele saastab põlevkivi kasutamine ka õhku.

Eesti ökoloogiline jalajälg on normist kõrgem. Seetõttu vajab keskkonda säästev tegutsemine rohkem tähelepanu, kui see siiani saanud on. Tänu põlevkivi varude vähenemisele, hakkab huvi taastuenergiaallikate kasutamisel energia tootmiseks suurenema.

Antud töö eesmärgiks on tutvustada keskkonda säästvat energia tootmisviisi. Põhu põletamine Eestis toimub vähesel määral, kuid on siiski olemas. Töös on kirjeldatud põhu saagikust ning ressursi, kuidas on võimalik seda kasutada energeetikas ning millised on Eestis konkureerivad kasutusala. Toodud on välja põhu kütteväärtus ning elementaarkoostis. Lühike ülevaade põhu käitlemisest- kuidas koristatakse ja ära märgitud hoiustamisel vajalikud tingimused. Tulenevalt hoiustamise keerukusele, on välja toodud väärustatud kütuse võimalused, mis lisaks hoiustamise lihtsustamisele tõstavad ka kütteväärtust. Kirjeldatud on erinevad põletustehnoloogiad ning nendest tulenevad heitmete probleemid.

2. PÕHK PÕLLUMAJANDUSES

2.1. Teravilja põhk

Põhk (illustratiivne joonis 1.1) on taimevartest, teradeta viljapeadest, lehtedest ja aganatest koosnev tera- ja kaunvilja- ning seemneheinakasvatuse kõrvalsaadus. [1] Teraviljade hulka kuuluvad kõrrelised, sealhulgas rukis, nisu, oder, kaer, mais, riis, hirss, sorgo, tritikale (nisu ja rukki hübriid) ja metsik riis ehk tuskarooro vesiriis. [2]



Joonis 1.1. Põhupall [3]

Osa põhku jääb koristusjäätina põllule, näiteks teraviljakõrre alumine osa (niitekõrguselt), varisenud terad ja muud taimeosad ning juured. Kõrrekoorimisega segatakse põhk ja mulla pindmine kiht, sellega kiirendatakse teravilja kultuuri koristusjäätagi lagunemist. Sellise moodusega tõstetakse oluliselt mullaviljakust, sest mulla orgaanilise aine varud täienevad ilma igasuguse lisaväetamiseta. Paraneb ka mulla struktuur ning hävivad umbrohtude tärpanud võrsed. [1]

21. sajandil on hoogustunud põhu kasutamine soojusenergia tootmisel. Põhk küttematerjalina on eriti keskkonnasõbralik, ka on tema hind võrreldes teiste energiakandjatega võrreldamatult madalam. Bioenergia kasutamine on jätkuvalt ka Euroopa Liidu prioriteete. [1]

2.2. Põhu ressurss ning saagikus

Põhk kuulub põllumajanduslike jääkide hulka, termin "põllumajandusjääd" viitab sellele osale saagist, mida ei koguta standardsete põllutööde käigus ja/või mis tavaliselt jäetakse põllule. Kuigi on olemas statistilised andmed peamiste põllumajandustoodete kohta, ei ole jääke põhjalikult dokumenteeritud ja alati ei olegi lihtne mõista, mis on konkreetses piirkonnas saadaval ja millisel hulgal on jääke võimalik kasutada bioenergia rakendusteks. [4]

Põhu ressurss sõltub nii teravilja liigist kui ka teravilja sordist. Lisaks oleneb põhu saak väga palju ilmastiku tingimustest. Taliviljade tera- ja põhusaak ei ole nii suures sõltuvuses ilmastikuoludest. Suviviljad on enam mõjutatud kevadisest ja suvisest põuast, mis omakorda avaldab mõju biomassi jaotumisele terade ja põhu vahel. [5]

Kaks peamist võimalikku lähenemist küsimusele, kuidas hinnata põllumajandusjääkide kogust ja kättesaadavust bioenergia rakendusteks järgmised:

- Esimene võimalus on koguda andmeid regiooni põllumajanduslike primaartoodete kohta ja seejärel hinnata jääkide tootmist, kasutades teatud koefitsiente ja oletusi nende kättesaadavuse kohta.
- Teine võimalus on koguda lähteandmeid tootmisjääkide enda kohta, enamasti küsitledes asjasse puutuvaid osapooli: farmereid, saagi koristamiseks palgatud lepingulisi töövõtjaid, logistikettevõtteid, lõppkasutajaid jne. Selle meetodi eeliseks on asjaolu, et kogutud info on rohkem seotud antud regiooni tingimustega ning peegeldab tegelikke turutavasid. Sellegipoolest ei pruugi mõningate andmete kvaliteet olla garanteeritud, meetod ise on aeganõudev ja kulukas ning, mis kõige tähtsam, see ei pruugi anda tulemusi nende materjalide kohta, millel lõppkasutaja puudub ja mis seetõttu kuuluvad ära vedamisele, näiteks põllul põletamisele. [4]

Tabelis 1.2.1 on toodud Eesti Statistikaameti andmete põhjal põllukultuuride kasvupind aastate kaupa mõõtühikuga tuhat hektarit. [6]

Tabel 1.2.1. Eesti põllukultuuride kasvupind aastate kaupa [6]

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Põllukultuurid kokku	539	579,6	577,4	566,6	602	585,3	568,8	590,2	608,4	614
Teravili	280,3	292,3	309,3	316,4	275,3	297	290,5	311,1	332,9	350,4
..taliteravili	33,9	59	70,9	69,7	68,2	70,9	86,3	59,7	102,8	120,3
....rukis	7,3	16,8	21,4	15,3	12,6	13,3	16,9	11,5	15,4	14,3
....talinisu	23,6	36,9	42,8	45	50,6	52,8	63,5	44,9	81	97,8
....talioder	0,5	0,9	0,8	1,4	1	0,3	0,3	0,1	0,2	1,1
....tritik	2,5	4,4	5,9	8	4	4,5	5,6	3,2	6,2	7,1
..suviteravili	246,4	233,3	238,4	246,7	207,1	226,1	204,2	251,4	230,1	230,1
....suvinisu	67,3	62,6	64,8	68,6	68,8	75,6	60,8	79,3	73,4	71,9
....oder	141,5	135,2	135,7	139,3	103,8	118	108,7	133	125,6	130,3
....kaer	32,6	31,5	34,2	36,1	30,4	28,4	31,8	34,8	27,3	24,4
....segavili	4,9	3,7	3,3	2,6	3,8	3,8	2,4	3,7	3	2,1
....tatar	0,1	0,3	0,4	0,1	0,3	0,3	0,5	0,6	0,8	1,4

Teravilja saak esialgsetel andmetel oli 2015. aastal 1 535 300 tonni, mis on 26% suurem kui aasta varem ja teadaolevalt Eesti kõigi aegade suurim. Teraviljasaagist 812 600 tonni moodustas nisu, 556 600 tonni oder ja 54 700 tonni rukis. Hektarilt saadi keskmiselt 4382 kilogrammi teravilja, sealhulgas nisu 4788, otra 4235 ja rukist 3823 kilogrammi. [7]

Põhusaagi uuringutega on tegelenud Jõgeva Sordiaaretuse Instituudis. 2007. aasta katseandmeid saab kasutada põuaste aastate korral, 2008. aasta katsetulemused võimaldavad arvutada põhusaake piisava niiskusega aasta puhul (tabel 1.2.2). [8]

Tabel 1.2.2. Teraviljade põhusaak ja põhu kaal võrreldes terasaagiga Eestis 2007.-2008. a [8]

	Põhusaak (kg/ha kuivaines)		Põhu kaal võrreldes terasaagiga (%)		
	2007	2008	2007	2008	Keskmine
Talirukis	4 747	5 868	77,6	86,9	82,3
Talinisu	5 141	4 784	61,3	62,6	62,0
Suvinisu	1 777	3 863	53,1	88,3	70,7
Oder	2 760	2 992	78,6	58,0	68,3
Kaer	2 243	3 706	84,2	69,5	76,9
Talitritik	4 622	6 910	86,6	78,6	82,6

Lähtudes teraviljasaakidest ja Jõgeva Sordiaaretuse Instituudi arvatud põhusaagi osakaalust on tehtud arvutused põhusaagikuse kohta. Vaatlusaluste aastate (2007-2010) näitel võib teravilja ja rapsi põhu kogusaak Eestimaa põldudel kõikuda 500 kuni 700 tuhande tonni vahemikus (tabel

1.2.3). 2010 aastal olid kuivuse tõttu nii teravilja saak kui ka põhusaagi osakaal väiksemad. Koguseliselt suurima osa teraviljade põhusaagist moodustab suvinisu ja odra põhk, kuid hektari kohta saadakse kõige rohkem põhku (kuivaines) taliviljast. Jõgeva Sordiaretuse Instituudi katseandmetel ületas talinisu põhu hektarisaak kuival aastal ligi kolmekordselt suvinisu põhusaaki. [8]

Tabel 1.2.3. Põhusaak Eestis 2007.-2011. a (tuh tonni) [8]

	2007	2008	2009	2010	2011
KOKKU PÕHUSAAK	687	652	671	532	592
sh teravilja põhk	614	591	596	460	518
odra põhk	285	202	219	200	197
suvinisu põhk	103	158	175	95	148
talinisu põhk	93	103	90	91	89
rukki põhk	47	57	34	20	24
kaera põhk	72	54	60	46	49
tritiku põhk	14	17	18	8	11
rapsi põhk	73	61	75	72	74

2.3. Põhu kasutamine energeetikas

Energiakultuurid on Eesti põllumajanduse jaoks suhteliselt uus. Termin „energiakultuurid“ tähistatakse siinjuhul igasugune põllumajanduslik tooraine, mis on kasvatatud kasutamiseks lähteainena energiakandjate nagu vedelate biokütuste ja biogaasi tootmiseks, või otseseks põletamiseks soojuse ja elektri koostootmisel. Energiakultuuride all ei mõelda vaid "uudsed" põllukultuure, kuivõrd mitut "traditsioonilist" toidu-, sööda- ja kiutaimekultuuri nagu rapsiseemneid, kanepit ja maisi saab edukalt kasvatada üksnes energiakandja tootmiseks. Neid põllukultuure on laialdaselt uuritud ja nad järgivad tüüpilisi tootmismudeleid: näiteks biogaasi tootmisel kasutatavat maisi koristatakse samamoodi nagu loomasöödaks mõeldud maisisilo. [9]

Võrreldes puitbiomassi varude kasutamisega, on rohtse biomassi varude kasutamine energia tootmiseks olnud siiani piiratud. Üllatavalt ei tähenda see aga seda, et potentsiaalseid biomassiallikaid, nagu näiteks põllumajanduslikke jääke, ei põletata – tegelikult põletatakse suurem osa neist pärast saagikoristamist põllul. Sel moel tekib kontrollimatu heitmete allikas ilma mingit energeetilist kasutamist leidmata, mis on ka võimalik tuleohu allikas. [10]

Põhu kasutamisel põletamisel soojusenergia saamiseks on oluliseks parameetriks selle tuhasisaldus ning tuha keemilisest koostisest (eelkõige kaaliumi sisaldus) tulenev sulamistemperatuur. Odra ja kaera põhku ei soovita põletamiseks kasutada madala saagi, suure tuhasisalduse ja ebasobiva tuha keemilise koostise tõttu. Odra ja kaerapõhu tuha keemiline koostis tingib tuha madala sulamistemperatuuri ja sellest tuleneva tehnoloogilise sobimatuse põletamiseks. Samuti on odra ja kaerapõhk sobimatud keskkonna aspektidest lähtuvalt, kuna nende puhul viidaks põllult ära teiste kultuuridega võrreldes palju suuremad taimetoitainete kogused. Rukki- ja nisupõhu osas on vajalik rakendusuuringute jätkamine aastate mõju selgitamiseks ning usaldusväärsemate andmete saamiseks. Täpsemat selgitamist vajab ka väetamise mõju põhu tuhasisalduse ning põletusomaduste kujunemisele. [11]

Kõige olulisem argument kasutades põhku energia saamiseks seisneb selles, et see kütus on süsihappegaasi neutraalne ja seetõttu ei aita suurendada süsihappegaasi sisaldust atmosfääris, hoides ära kasvuhooneefekti süvenemise. [12]

Põhu täieliku ärakasutamise korral oleks võimalik töösse rakendada kuni 500 MW ulatuses küttekatlaid ja põhu 30% ulatuses kasutamise korral ikkagi kuni 150 MW ehk kaks planeeritavat suurt koostootmisjaama. Seega tuleks põhuressursi energeetilise kasutamisega seonduvaid põllumajanduslikke ja majanduslikke aspekte põhjalikumalt uurida ning otstarbekas mahus see täiendav energiaressurs ära kasutada, kusjuures ühe alternatiivina tasuks kaaluda põhu kasutamist planeeritavate koostootmisjaamade kütusena. [13]

Põhu kasutamiseks energeetikas on sobivaimaks tehnoloogiaks eeldatud tooraine põletamine. [9] Energiaks ümberarvestatult kasutati 2010. aastal 6 teradžauli põhku kütteks. Põhust saadi 4 TJ (tabel 1.3) soojusenergiat. Arvestades ka kasutajaid, kelle kogused ei ole teada, võis põhust saadud soojusenergia hulk olla vähemalt 10 TJ võrra suurem. 500 tonni põhu tarnimiseks oleks vajalik ligikaudne teravilja kasvupind 125 ha, kui arvestada eeldatavaks põhusaagiks 4000 kg/ha kohta talinisul või 275 ha kui arvestada eeldatavaks põhusaagiks 1800 kg/ha kohta suvinisul. [8]

Kütteks kasutatud põhu kokkuostuhind ei ole Eesti Konjunktuuriinstituudi andmetel viimase viie aastaga palju muutunud. 2011. aasta novembris maksis üks tonn 43 € (km-ta), mis oli 4% kõrgem kui 2007. aasta novembris. [8]

Tabel 1.3. Põhu tarbimine soojuseks ja sellest saadud soojusenergia Eestis 2007.-2010. aastal (TJ) [8]

	Põhu tarbimine soojuseks				Saadud soojusenergia			
	2007	2008	2009	2010	2007	2008	2009	2010
PÕHK	10	4	5	6	7	3	3,5	4

Palju põhuküttega katlamaju on rajatud Põhjamaades. Eestis töötab mitu sellist kompleksi (nt Lihulas – seal köetakse lisaks põhule ka roogu ja heina – ja Tamsalus), samuti toodetakse põhubriketti (joonis 1.3). [1]



Joonis 1.3. Põhubrikett [14]

2.4. Konkureerivad kasutusala

Eestis on põhku kasutatud põhiliselt mullaviljakuse parendamiseks ja maasse küntud, väiksemaid koguseid on kasutatud ka loomade allapanuks. 2004-2005. aastail põhuga kütmist veel ei toimunud. [5]

Põhu sissekündmine tähendab, et põllult äraviimise asemel küntakse põhk sisse. Põhu sissekündmisega on võimalik saavutada viivitamatu mõju lämmastikule, sest suure süsiniku

lämmastiku (80:1)- vahekorraga põhk hoiab kinni osa lämmastikust, mis muul juhul vee kaudu leostuks. [15]

Heade ehitismehaaniliste- ja füüsikaliste omaduste, naturaalsuse ning taastuva ressursi tõttu kogub põhk populaarsust ehitusmaterjalina. Eriti märkimisväärseks võib pidada põhu soojustavaid omadusi. [16]

Põhk on kaks korda parem soojusisolaator kui puit. [17] Temast valmistatakse nii puitkarkassi täidist kui ka rajatakse kandvaid tarindeid (pakitud põhust). Põhuehitus on ökoloogilise ehituse haru, ta on populaarne mitmes riigis (nt Austraalias, Saksamaal, Austrias, USA-s). Eestis on põhust ehitatud väikemaju ja abihooneid, 2011. aastal ehitati Tallinnas NO99 ühe suve projekt Põhuteater (joonis 1.4). [1] Eestis oli 2008. aasta andmetel ligi viiskümmend põhumaja ning hind on tavaehitusega samas suurusjärgus. [17]



Joonis 1.4. Põhuteater [18]

3. PÕHU PÕLETUSTEHNILISED NÄITAJAD

3.1. Elementaarkoostis

Põhk sisaldab keskmiselt 14-20% vett, mis aurustub põlemisel. Kuiv põhk sisaldab keskmiselt 50 % süsinikku, 6 % vesinikku, 42 % hapnikku ning vähesel hulgal lämmastikku, väävlit, räni, leeliseid, kloriide ja teisi. Põhu kasutamisel kütusena ei tohi veesisaldus põhus ületada 20 %. [19]

Põhk, mis on kasvamisel palju kokku puutunud vihmaga, eriti peale viljakoristust ning on seetõttu muutunud halliks, on vähem agressiivne kui kollane põhk, mis on saanud vaid vähesel määral vihma. [19]

Tuhasisaldus varieerub 2-10 % vahel, kuigi keskmiseks loetakse 4 %. Põhk, mida on kasvatatud liivases mullas on tavaliselt madalam tuhasisaldusega. Kütteväärtus on kõrgeim madalaima tuhasisaldusega. Põhu tuha sulamispunkt oleneb teraviljast. Tabelis 2.1 on toodud põhu elementaarkoostis. [19]

Odrapõhu tuhk sulab madalamal temperatuuril kui nisupõhu tuhk. Rapsipõhu sulamistemperatuur on kõige kõrgem. [20] Kui enamasti põletamisel tekkinud tuhk võib muutuda kleepuvaks 600 kraadi juures, siis näiteks rukisel on sulamistemperatuuriks 1002 kraadi ning tritikalel 911 kraadi. [21]

Tabel 2.1. Põhu elementaarkoostis [19]

	Kollane põhk	Hall põhk	Puiduhake	Kivisüsi
Veesisaldus	10-20 %	10-20 %	40-50 %	12%
Tuhk	4 %	3 %	1 %	12 %
Süsinik	42 %	43 %	50 %	59 %
Vesinik	5 %	5 %	6 %	4 %
Hapnik	37 %	38 %	38 %	7 %
Kloriidid	0,75 %	0,20 %	0,02 %	0,08 %
Lämmastik	0,35 %	0,41 %	0,30 %	1,00 %
Väävel	0,16 %	0,13 %	0,05 %	0,80 %
Kütteväärtus	14,4 MJ/kg	15,0 MJ/kg	10,4 MJ/kg	25,0 MJ/kg

4. KÄITLUS KÜTUSEKS

4.1. Põhu koristus

Põhu koristus sõltub teraviljasaagi koristusperioodist. Enamus koristustöid toimub suvekuudel. [22] Kui viljasaak on koristatud, jätab kombain põhu koristuseks põllule või lõikab selle tükkideks ning hajutab sisse kündmiseks põllul laiali. Tavaliselt tehakse põhust pallid.

Tänapäeval kasutatakse nelja erinevat tüüpi põhupalle:

- väikesed põhupallid
- ümmargused põhupallid
- keskmise suurusega põhupallid
- suured põhupallid (Hesstoni põhupallid)

Väikesed pallid kaaluvad umbes 10-15 kg ja ümmarguste pallide kaal varieerub 200-300 kg. Mõlemaid kasutatakse väikestes kateldes. Keskmised pallid on umbes 150 kg ning nende kasutamine toimub suuremates kateldes. Suured pallid on kõige raskemad, nende kaal ulatub 450 kg ja neid kasutatakse enim katlamajades, kuid see toimub suuremates riikides, kus põhu kasutamine on populaarsem kui Eestis. [23]

Enamik põllumehi soovivad põhu võimalikult ruttu põllult ära koristada, et nad saaksid planeerida järgmise aasta saagi istutamist. Ometi võib põhu jätmine põllule paariks päevaks või nädalaks olla kasulik. Kui põhk saab paaril korral vihma käes põllul asetseada ja peale seda jälle ära kuivada, muutub see „halliks põhuks“, millel on, nagu eelnevalt käsitletud, paremad omadused, kuna vihm peseb põhust probleemsed ained nagu kloor ning leelised. [19]

Parimad ilmastikutingimused põhupallide valmistamiseks on kergelt tuuline ning 50 % või madalam niiskusega ilm. Kuna hommikul on niiskuse tase kõrgem, siis on soovitatav pallimist teha

hiljem päeval. [24] Õlgede saagikus on tavaliselt umbes kolm tonni hektari kohta, kuid see sõltub palju viljast, saagikusest ja ilmastikust. [19]

4.2. Transportimine

Põhu käitlemine ning transportimine võib olla üks suuremaid kulusid kogu põhu põletamisprotsessi jooksul. Transportimisel tuleb kindlasti arvestada põhupallide suurusega, kogusega, kui kaugele on vaja transportida, millega on võimalik transportida, ohutusega ja ilmastikuoludega. [25]

Põhu transportimiseks kasutatakse mitmesuguseid meetodeid sõltuvalt kohalikest tingimustest. Väikeseid põhupalle laetakse põllult laaduri peale ja hoidlas maha käsitsi. Ümmargused põhupallid laetakse frontaallaaduriga, mis on kõige levinum masin põllul ning hoidlas. Sõltuvalt laadurist ja tõstmisvõimest, käideldakse korraga üks kuni kaks palli. Transportimiseks kasutatakse rekonstrueeritud veoautosid, haagisega veoautosid või ka tavalisi haagisega traktoreid. Tavaliselt sisaldab üks haagis 8 kuni 14 põhupalli. [26]

Keskmise suurusega põhupallide laadimine ning vedu toimub sarnaselt eelnevaga, ainuke erinevus on koorma suuruses, kuna siis kasutatakse suurema kandevõimega masinaid, millele saab korraga peale panna 12 kuni 45 palli. [26]

Suurte pallide puhul kasutatakse laadur-ekskavaatorit või frontaallaadurit. Maha laadimiseks on sobivam laadur-ekskavaator (joonis 3.2), sest sellega on võimalik tõsta maha ka kõrgemal olevaid palle. Koorma suurus on 6 kuni 18 palli. [26]



Joonis 3.2. Laadur-ekskaator [27]

4.3. Ladustamine

Põhu kasutamisel energia tootmiseks tuleb suurt tähelepanu pöörata tuleohutusele, sest üheks suurimaks probleemiks põhu ladustamisel on põlengu võimalus. [28]

Niiskusesisaldus on peamine tegur, mis põhjustab põhu iseenesliku süttimise. Peale teravilja lõikust, hingamine taime kiududes (taime suhkru põletamine energia valmistamiseks) jätkub taimerakkude, mis omakorda põhjustab väikeste soojuse koguste vabanemist. Kui niiskusesisaldus põhus on soovituslikul tasemel (20 % või vähem), taimerakkude hingamine aeglustub ning lõpuks lõpeb. [24]

Kui põhu niiskusesisaldus on üle 20 %, on tekkinud keskkond, mis on sobilik põhus leiduvate mesofiilsete (sooja temperatuuri) bakterite kasvuks ja paljunemiseks. Mesofiilsed bakterid vabastavad soojust, mille tulemusel toimub põhu sisemine temperatuur tõuseb 54-60 kraadini. Sellises temperatuuri vahemikus bakter sureb ning temperatuur põhus langeb. Tulerisk on suurem heinal, kuna heina temperatuur ei lange peale esimest sisemist soojenemisperioodi. Mesofiilsete bakterite poolt tekitatud kuumus loob termofiilsetele (kuumust armastavatele) bakteritele sobiva kasvuala. Lihtsustatult, mida suurem on niiskusesisaldus, seda kauem püsib kõrgem temperatuur põhupallis. Näiteks 30 % niiskusesisaldusega põhupallis võib kõrgem sisemine temperatuur püsida kuni 40 päeva. Termofiilsete bakterite olemasolul nende kogus kasvab ning sellega kasvab ka kuumus, mis võib tõusta üle 75 kraadi. Sellise temperatuuri juures võib tulla ette isearenevat süttimist. [24]

Kõige parem viis vähendada tulekahju riski, on põhu pallimine 20 % või vähema niiskusesisalduse juures, mis vähendab mikroobide aktiivsust. Väiksemat niiskusesisaldust on võimalik saavutada õige ilmastikuga. Ka on võimalik kasutada spetsiaalseid säilitusaineid ning koristamiseks sobivat varustust, mis on disainitud kuivamisastme suurendamiseks. [24]

Põhu kuivana hoidmine on üks tähtsamaid tegevusi. Selleks on vajalik kontrollida, et hoidla, kus põhku ladustatakse, oleks ilmastikukindel ja korraliku drenaažiga, mis takistaks vee sisenemist hoidlasse. Juhul kui põhupalle ladustatakse õues, tuleb need katta veekindla materjaliga, kuid kui selline võimalus puudub, on vaja pallid paigutada nii, et õhu liikumine soodustaks kuivamist. Pinnaseniiskuse eest saab kaitsta kruusa pinnasega või tõstes pallid pinnasest kõrgemale rehvide, postide või kaubaaluste abil. [24]

5. VÄÄRISTATUD KÜTUSED

5.1. Põhupellet ning põhubrikett

Üheks lihtsaimaks võimaluseks põhu kasutamisel energia tootmiseks, on tervete põhupallide põletamine. [29]

Teiseks võimaluseks on põhupallidest pelletite või briketi valmistamine. Pelletite valmistamine suurendab kulutusi, kuid vastutasuks on võimalik transpordikuludelt kokku hoida, eriti seda juhul siis, kui põhku on vaja vedada kaugematesse distantsidesse. Suured hoidlad, kraanad ning transpordisüsteemid saab asendada kõrgete silohoidlaga, mille ülaosasse on paigutatud puhurid ning maha laadimine toimub alt. Kõik see suurendab kokkuhoidu samal ajal kõrvaldades osaliselt või täielikult probleemid põhu ning tolmuga. [19]

Pelletite valmistamisel peab kindlasti kasutama kuiva põhku, mis ei tohi olla seisnud õues või põllul ja niiskusesisaldus on alla 20 %. Oluline on ka hallituse puudumine. Põhku purustatakse kaks korda. [30]

Pelletite valmistamiseks tuleb materjal esmalt jahvatada sobiva suurusega osakesteks ja siis isostaatiliselt pressida, et moodustuksid ühesuguse kujuga osakesed. Pelletite valmistamiseks peab isostaatiline surve olema piisavalt tugev, et raku struktuuri lõplikult purustada. [31]

Rapsipõhust valmistatud pelletid ei vaja spetsiaalseid katlaid, nende kasutamine võib toimuda ka puitgraanulite katlas, kuid teistest teraviljasortidest valmistatud põhk vajab spetsiaalseid katlaid. [32]

Põhupelletid on umbes 8 mm läbimõõduga. [32] Põhupelleti kütteväärtus on 18,1 MJ/kg. [33]

Põhu põletamisel tekkinud tuhka saab kasutada mineraalväetisena tänu taimede kasvuks vajalikele kõrgetele ainete sisaldusele. [33]

Põhust briketi tootmine käib sarnaselt pelletite valmistamisele. Esmalt põhk hakitakse ning seejärel surutakse kokku kõrge rõhu all. Kineetilise energia mõjul tekivad väikesed auru plahvatused, mis purustavad poorid ning kiud. [34]

Põhul on puidust väiksem energiatihedus. Põhu briketeerimisel on võimalik saada aga isegi küttepuidust suurema energiatihedusega toode (põhubriketil 12,7 MJ/dm³, puidul 7 MJ/dm³). [8]

Suurimaks miinuseks pelletite ning briketi põletamisel on põletamisel tuhasisalduse suurenemine, kui eelnevalt oli tuhasisaldus 3-4 %, siis briketil ning pelletitel on see 7 %. [33]

Suurimaks eeliseks enamikust töötlemata biomassipõhistest kütustest on pelletite kui brikettide kasutamine suhteliselt standardsetes kütteseadmetes, näiteks kaminates, ahjudes, väikekateldes. Pelletite (joonis 4.1) korral on eeliseks veel koldesse etteandmise ja põletusprotsessi automatiseeritavus, mis annab kasutajale suure mugavuse ja võimaluse lihtsalt üle minna näiteks kergelt vedelkütuselt pelletite põletamisele katla sobivuse puhul. [29]



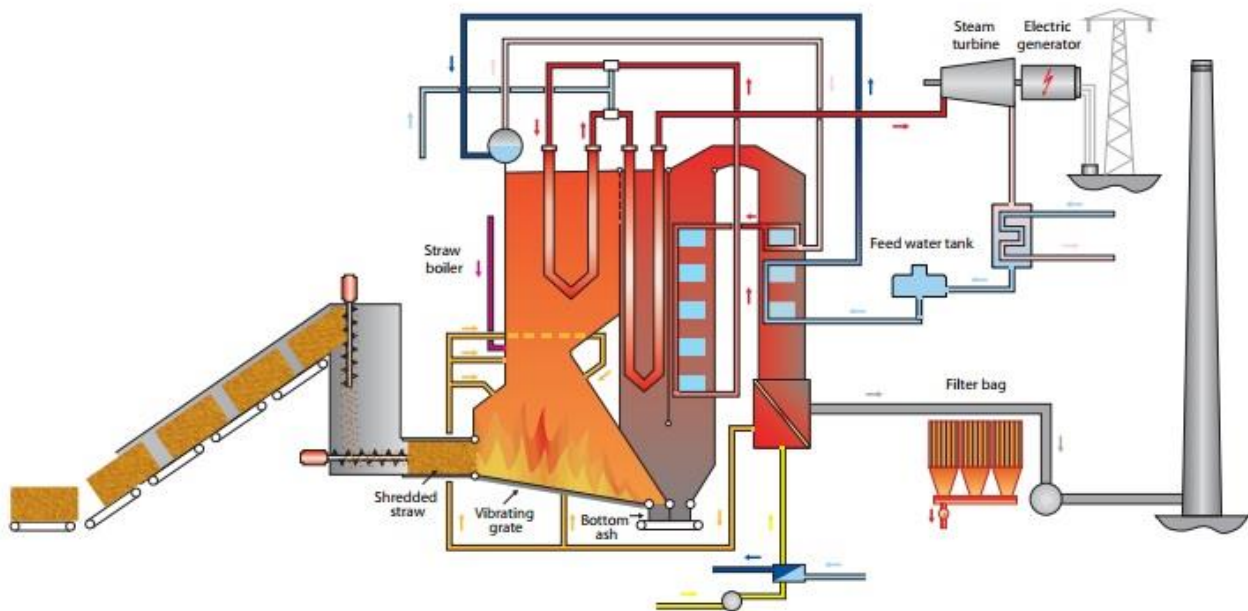
Joonis 4.1. Põhupellet [35]

6. PÕLETUSTEHNOLOOGIAD

Põhu põletamiseks on vaja üldreeglina kindla konstruktsiooniga põletusseadmeid, mis võtaks arvesse põhu iseärasusi. [29]

6.1. Restkoldega põletus

Enamus restpõletusega katlamajades, toidetakse põhupallid laorumist läbi purustaja, peale mida suunatakse põhk teo abil restile. Restpõletamisel (joonis 5.1) toimub põlemine restil, mis asub katla kambri alumises osas. Tavaliselt viitab see viltusele veejahutusega restile, mis vibreerib regulaarsete intervallidega, liigutades põhku aeglaselt tuha eemaldamise väljapääsuni. Väiksem osa tuhast- lendtuhk- juhitakse läbi katla ning kogutakse filterkotti enne kui suits suunatakse korstnasse. [19]



Joonis 5.2. Restpõletusega katel [19]

Koldesse jõudmisel toimub restil sisuliselt kütuse gaasistumine; kuumad suitsugaasid põletatakse põlemiskambri ülaosas. Kuna enamuse kütuse massist ja energiast vabaneb lenduvate gaasidena, on oluline, et põlemiskambri ülemise osa konstruktsioon oleks õige tagamaks parajat segunemist õhuga ja osakeste piisavat viibeaega. [10]

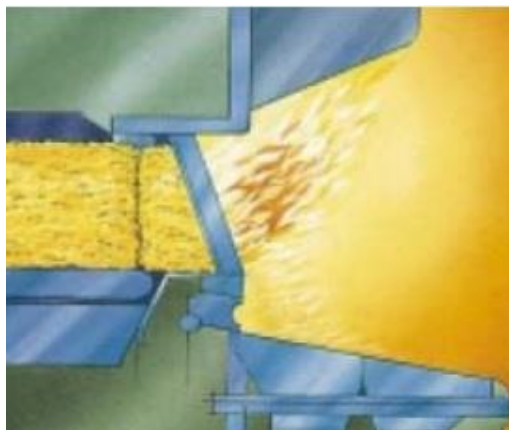
Peale vibreeriva resti on olemas ka liikumatu rest, mis toimib üksnes raskusjõu mõjul. Lisaks vibreerivale restile on olemas ka edasi-tagasi liikuv ning pöörlev rest. [10]

Kõige sobilikum põhu põletamiseks ongi vibreeriv kolderest, sest seda kasutatakse tavaliselt madala tuhasulamistemperatuuriga kütuste põletamisel. Vibreerimine hoiab ära suurte sulanud tuhaklompide moodustumise. [10]

6.2. Sigar-tüüpi põletus

Üks lihtsamatest võimalustest tervete põhupallide põletamiseks on sobivate seadmete kasutamine. [36] Põhupakkide põletamise katelde kasutegur on vahemikus 60 - 80% ja see sõltub paljus katla konstruktsioonist, koormatusest ja võimsusest. [37]

Põletusseade saab töötada tsükliliselt, algul tõstetakse põhupall frontaaltõstukiga koldesse avatud koldeukse kaudu, seejärel uks suletakse ja kütus süüdatakse. Põlemisõhk puhutakse põlemistsooni ülalt. Tsüklilise põlemise tõttu on põlemisõhu doseerimine ja põlemise kõrge efektiivsuse saavutamine keeruline. Põhupõletuskatelde efektiivsus sõltub lisaks kasutatavale tehnoloogiale ka seadme koormusest ja võimsusest. [36]



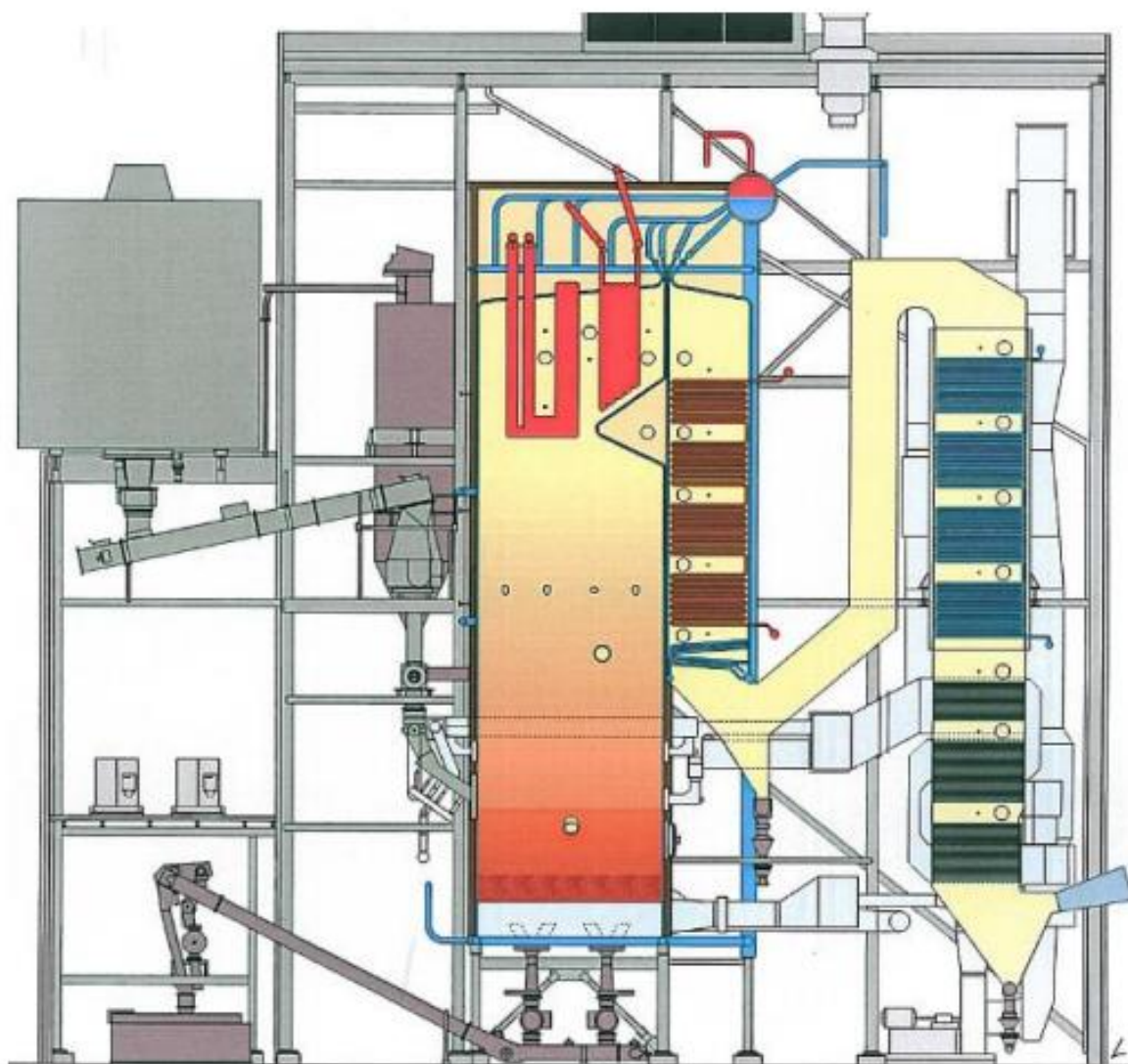
Joonis 5.2. Sigar-tüüpi põletus [36]

Põhupalle on võimalik koldesse anda ka järjestikku ilma peenestamata, seda nimetatakse „sigar”-tüüpi (joonis 5.2) põletusviisiks. [36] Sellesse põletisse pannakse põhupall ilma eelneva hakkimiseta tervikuna sisse. Osa pallist põletatakse resti kohal koldesse sisenemisel, samas kui osa pallist põletatakse all restil. Selle süsteemi eelis on see, et seda kütust saab pidevalt sisestada isegi minimaalse eeltöötlemiseta. Puudusteks on see, et käsitseda saab ainult pallitud põhumassi, palli suuruse muutustel on tugev mõju põlemisele ja suhteliselt suur on CO heide ning kasutegur on väike. Neil põhjustel seda tehnoloogiat uutes seadmetes ei kasutata ja praktilistel põhjustel on sellest loobutud. [10]

6.3. Keevkihtpõletus

Keevkihtsüsteemi (joonis 5.3) tehnoloogia põhiidee on see, et kütust põletatakse “inertse” materjaliga täidetud kihis, samas kui õhu juurdevool toimub põletamiskambri alt. Eeldusel, et õhu kiirus on piisavalt suur, tõstetakse kiht üles ja kütuseosakesed kihist välja ning tekib nn “vedelfaas”. [10]

Keevkihtpõletusel on võimalik põletada erinevate osakeste suuruse, niiskuse ja tuhasusega laias valikus tahkeid kütuseid. Neil on kõrge soojusvõimsus ning kütusevarustuse katkemise korral on neid võimalik uuesti tööle panna. Kütuseosakeste kihis viibimise aeg on pikk, seega on võimalik saavutada suurt kasutegurit isegi madalatel töötemperatuuridel. Vähenenud NO_x heide annab veelgi lisakasu. Keevkihti saab anda sobivaid lisaaineid, mis seovad väävlit ja seega väheneb SO_x heitkogus, tänu millele kaob järelpuhastussüsteemide vajadus. [10]

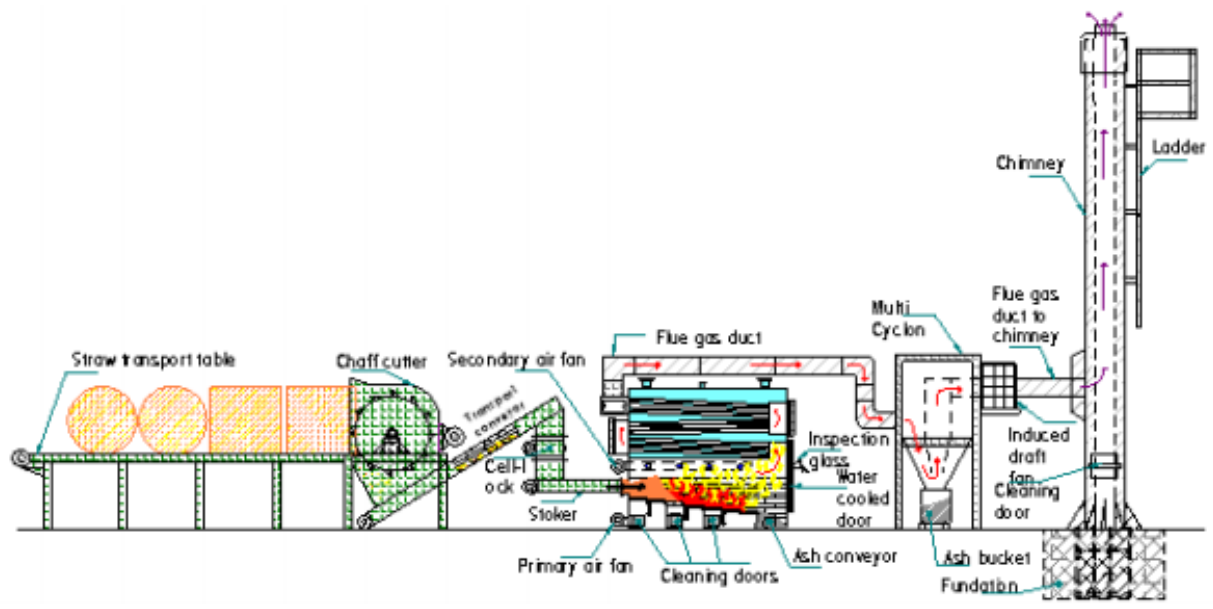


Joonis 5.3. Traditsiooniline keevkiht katel [38]

Puudusteks võib pidada suurt osakeste koormust, mis nõuab tõhusaid tolmu puhastuse süsteeme ja kihiga kokkupuutuvate pindade suurem erosioon. Kõige suurem probleem on paakumine. Kuna õhu kiirus sõltus osakeste omadustest, siis liiga väikesed osakesed lahkuvad keevkihi tekkimise tsoonist, kuid liiga suured osakesed ei jõua põleda ning langevad põhja. See omakorda põhjustab osakeste kleepumise pinna külge, mis tekitab klompe ning takistavad õhu liikumiskiirust. Põhu põletamisel võivad tekkida saastumise ja korrosiooni probleemid, sest põletatakse suure kloori ja leelismetallide sisaldusega biomassi. [10]

6.4. Peenestatud põhu põletus

Peenestatud põhu põletamisel purustatakse pakk katla juures spetsiaalse purustiga ja põhk põletatakse stokerpõletis. Puudub muud tüüpi kütuse kasutamise (näiteks hakkpuit) võimalus, samas saab edukalt põletada nii pakitud põhku kui ka pakitud heina. Katlad on täisautomaatsed. Pakkide konveier ehitatakse tavaliselt piisavalt suur tagamaks katla täisvõimsusel töö 24 tunniks, peale seda tuleb konveieri lint täita uuesti pakkidega. Paki purustajaid on kahe suurusega väikeste ja suurte pakkide jaoks. Põhu tuha omaduste tõttu on rest ehitatud liigutatavaks, et tagada tuha liikumine restilt maha. Katla kasutegur on vahemikus 80-90%. Selline katel ei vaja pidevat järelvalvet, vaid kord päevas tuleb täita kütuse etteande konveierit. [37]



Joonis 5.4. Põhuhakke katel [37]

7. HEITME PROBLEEMID

7.1. Süsinikdioksiid

Palju tähelepanu energia tootmisel pööratakse keskkonnaaspektidele. Põhul on kindlad eelised seoses süsinikdioksiidiga, mida peetakse põhiliseks kasvuhooneefekti põhjustajaks. [23]

Kui põhku põletatakse, ei tekita see rohkem süsinikdioksiide, kui see on neid tarvitanud oma kasvu ajal, seetõttu peetakse põhku süsinikdioksiidi neutraalseks. [23]

Põhku peetakse süsinikdioksiidi neutraalseks kütuseks.

7.2. Lämmastikoksiidid

Põhu põletamisel, lämmastikoksiidi tekib samades kogustes, kui teiste kütuste põletamisel. Lämmastikoksiidid võivad olla NO, NO₂ või NO₃. See tekib lämmastikusisalduse põhjal õhus ning kütuses. Lämmastikoksiidide tekkel mängib suurt rolli katla kujundus ja põleti. [23]

7.3. Vääveldioksiid

Kui põhku kasutatakse kütusena katlamajades, tekib vähem vääveldioksiide võrreldes kütteõliga, mida põhk asendab. Juhul kui alternatiiviks on maagaas, ei paku põhu põletamine mingeid eeliseid. Igal juhul on vääveldioksiidi olemasolu suitsugaasides soovimatu. See aitab kaasa atmosfääri hapestumisele, tekitades väävelhapet, mida pole võimalik koguda filtri abil. Seda on võimalik

eemaldada läbi märja või kuiva väävlipuhastus protsessi abil. Tabelis 6.2 on toodud heitmete väärtused erinevate kütustega. [23]

Tabel 6.2. Heitmete väärtused

Kütus	Vääveldioksiid g/GJ	Lämmastikdioksiid g/GJ	Süsinikdioksiid kg/GJ
Kivisüsi	584	200	102
Kütteõli	495	150	74
Gaasiõli	90	100	74
Maagaas	0	150	57
Prügi	600	150	30
Põhk	130	130	0
Puit	130	130	0

7.4. Kloor

Kloori ja leeliste sisaldus suitsugaasides võib olla probleemiks põlemisel, mis viib naatriumkloriidi ja kaaliumkloriidi tekkele. Naatriumkloriid ning kaaliumkloriid on ülimalt agressiivsed ja põhjustavad korrosiooni kateldes ja torudes, eriti kõrgetel temperatuuridel. [19]

Kloorisisaldust on võimalik mõjutada. Näiteks varakult koristatud teravilja põhu (nn. kollase põhu) kloorisisaldus on kuni neli korda kõrgem kui hilja koristatud teraviljal. Kuna ka põhu kütteväärtus ja muud omadused seismisel paranevad (nt väheneb kloorisisaldus), siis oleks otstarbekas kasutada üleelmise aasta põhku. See eeldab aga aastast tarbitava põhukoguse ladustamist, lisaks veel samal aastal tarbitavale põhu kogusele. [29]

KOKKUVÕTE

The use of straw for energy production

Põhu kasutamise hulk energia tootmiseks Eestis võiks olla tunduvalt suurem, kui hetkel seis on. Põhu saagikus sõltub teravilja sordist ning ilmastikuoludest. Eestis oli viimase aasta teraviljasaak teadaolevalt suurim. See omakorda tähendab ka suuremat põhusaaki. Kõige konkureerivamaks kasutusalaaks võib pidada põhu sissekündmist maasse. Põhu sissekündmine toimub eelkõige mullaviljakuse suurendamiseks. Lisaks kasutatakse põhku ka ehituses, kuid Eestis on see alles suhteliselt uus tegevus.

Põhu kütteväärtus on suurem, kui puiduhakkel (põhul 14,4 MJ/kg ning puiduhakkel 10,4 MJ/kg) kuid jääb alla kivisöele (25 MJ/kg). Põhu põletamisel on kõige tähtsam pidada silmas selle tuhasisaldust ning sulamistemperatuuri. Erinevatel teraviljaliikidel on see erinev. Kogu põhu kasutamisel oleks võimalik töösse rakendada kuni 500 MW katlaid. Sobivaimaks tehnoloogiaks loetakse tooraine põletamist.

Üheks suurimaks kuluks põhu kasutamisel energia tootmiseks võib pidada transportimist ning hoiustamist. Põhupallid on küllaltki suured ning vajavad spetsiaalseid masinaid, mis tagaks ka ohutuse, nende transportimiseks. Peale selle vajab olulist tähelepanu hoiustamine, kuna valesti hoiustades, on võimalik kogu saagil põlema süttida.

Transpordi- ja hoiustamiskulusid on võimalik vähendada põhu briketeerimisel või pelletite valmistamisel. Suureks eeliseks põhu briketeerimisel on see, et on võimalik saavutada puidust suurema energiatihedusega toode (põhubriketil 12,7 MJ/dm³, puidul 7 MJ/dm³) ning põhubriketti ning põhupelletteid on võimalik kasutada suhteliselt standartsetes kütteseadmetes. Miinuseks on tuhasisalduse suurenemine, kuid tänu tuha suurele mineraalsete ainete sisaldusele, saab seda kasutada mineraalväetisena.

Põletamisel on vaja kindla konstruktsiooniga põletusseadet. Restkoldega põletusel suunatakse põhupallid läbi purustaja, peale mida suunatakse põhk restile, kus toimub põlemine. Lihtsaim põletusviis on sigar-tüüpi põletus, kus põletatakse terved põhupallid, mis on järjestikku suunatud koldesse. Kasutusel on ka keevkihtpõletus, kuid seal tekib probleem paakumisega. Peenestatud

põhu põletusel purustatakse pakk katla juures ja põhk põletatakse stokerpõletis. Katel on täisautomaatne ning ei vaja järelvalvet. Vajalik on ainult kütuse etteandmine konveierile.

Keskkonnaaspektidele tähelepanu pöörates, on kõige tähtsamaks aspektiks, et põhku peetakse süsinikdioksiidi neutraalseks kütuseks. Lämmastikoksiide tekib samas koguses, mis teiste kütuste põletamisel, nende tekkel määrab suurt rolli katla kujundus. Võrreldes kütteõliga tekib vähem vääveldioksiide, kuid maagaasiga võrreldes, ei paku põhk mingeid eeliseid.

Põhu põletamisel on suurimaks probleemiks kloor, mis tekitab kateldes saastumist ning korrosiooni. Kuid kloorisisaldust on võimalik mõjutada. Näiteks hiljem koristatud põhu kloorisisaldus on väiksem kui varakult koristatud. Põhu kütteväärtus suureneb ning kloorisisaldus väheneb põhu seismisel. Seega on mõistlik kasutada põletamisel üleelmisel aastal korjatud põhku.

SUMMARY

The use of straw for energy production in Estonia should be much higher than the current status is. Straw yield depends on the grain variety and weather conditions. Last years grain yield was the largest known. This, in turn, means a greater straw yield. The competition can be considered more representative in agriculture, where it is used to increase soil fertility. Straw is also used in construction, but this is relatively recent.

Straw calorific value is greater than the wood chips (straw 14,4 MJ/kg and wood chips 10,4 MJ/kg), but remains lower than coals (25 MJ/kg). The most important thing to keep in mind, when burning straw, is the ash content and melting point. This varies with different cereals. The most suitable technology is burning raw material.

One of the biggest cost can be considered transport and storage. Straw bales are relatively big and demand specific machinery for transportation. Furthermore it storing requires significant attention, because it can catch fire by itself, when it is not been stored correctly.

Transport and storage costs can be reduced by manufacturing straw pellets or briquette. Straw briquette has higher energy density than wood (briquette 12,7 MJ/dm³, wood 7 MJ/dm³). The disadvantage is the increase of the ash content, but because of the high content of minerals, it can be used as a mineral fertilizer.

Burning straw requires a combustion plant with a certain structure. In grate-fired, the straw bales are being shredded, after which it is placed on a rack, where the combustion takes place. The simplest way is “cigar”-burning. This means burning the whole bales, which are sequentially directed to the furnace. Fluidized bed combustion is used as well, but there arises a problem with sintering. Using chopped straw burning, the bale is being shredded before the boiler and then burned in stokerburner. The boiler is fully automatic and does not require monitoring. It is only necessary feeding fuel on the conveyor.

Straw is considered to be carbon dioxide neutral fuel. The amount of nitrogen oxide is the same as in other fuels. Major role in this plays the design of the boiler. Compared to heating oil, less sulfur oxides are emerged but compared with natural gas straw does not have any advantages.

The biggest problem in burning straw is with chlorine, which causes contamination and corrosion in boilers. However the chlorine content can be influenced. For example the straw which has been harvested later, contains less chlorine than the straw which was harvested early. Straw heating value increases and the chlorine content decreases when straw is being stored for a longer period. Therefore it is wise to use the straw which was picked up more than a year ago.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] S.Tõlp, „Eesti Entsüklopeedia,“ 2009. [Võrgumaterjal]. Available: <http://entsyklopeedia.ee/artikkel/p%C3%B5hk1>. [Kasutatud 09 05 2016].
- [2] Vikipeedia, „Vikipeedia,“ 04 01 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <https://et.wikipedia.org/wiki/Teravili>. [Kasutatud 05 09 2016].
- [3] M. Hamilton, „fineartamerica,“ 15 08 2009. [Võrgumaterjal]. Available: <http://fineartamerica.com/featured/straw-bale-margaret-hamilton.html>. [Kasutatud 09 05 2016].
- [4] BISYPLAN, „BISYPLAN,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://bisyplan.bioenarea.eu/html-files-es/02-02.pdf>. [Kasutatud 09 05 2016].
- [5] Eesti Konjunkturiinstituut, „Energiatalgud,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://www.energiatalgud.ee/img_auth.php/3/3f/EKI._Ylevaade_Eesti_bioenergia_turust_2007.pdf. [Kasutatud 09 05 2016].
- [6] Eesti Statistikaamet, „Eesti statistika,“ Eesti statistikaamet, 26 01 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.stat.ee/34222>. [Kasutatud 09 05 2016].
- [7] Eesti Statistikaamet, „Eesti statistika,“ 26 01 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.stat.ee/277611/?highlight=teravilja>. [Kasutatud 11 05 2016].
- [8] Eesti Konjunkturiinstituut, „Eesti Konjunkturiinstituut,“ 12 2011. [Võrgumaterjal]. Available: http://www.ki.ee/publikatsioonid/valmis/Ylevaade_Eesti_bioenergia_turust_2010_aastal.pdf. [Kasutatud 25 05 2016].
- [9] Tartu Regiooni Energiaagentuur, „Energiatalgud,“ 2013. [Võrgumaterjal]. Available: http://www.energiatalgud.ee/img_auth.php/a/a2/Tartu_Regiooni_Energiaagentuur._Biok%C3%BCtuste_kasutamine_energeetikas_L%C3%B5una-Eesti_regioonis._2013.pdf. [Kasutatud 10 05 2016].
- [10] BISYPLAN, „BISYPLAN veebipõhine käsiraamat,“ 2012. [Võrgumaterjal]. Available: <http://bisyplan.bioenarea.eu/html-files-es/04-02.html>. [Kasutatud 26 05 2016].
- [11] Jõgeva Sordiaretuse Instituut, „Energiatalgud,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://www.energiatalgud.ee/img_auth.php/9/9b/J%C3%B5geva_Sordiaretuse_Instituut._P%C3%A4ideroo,_teraviljade_ja_kanepi_kasutusv%C3%B5imalused_energiakultuurina_Eestis.pdf. [Kasutatud 26 05 2016].
- [12] „Videncenter for Halm- og Flisfyring,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://www.videncenter.dk/gule%20halm%20haefte/Gul_Engelsk/halm-UK02.pdf. [Kasutatud 26 05 2016].
- [13] V. Vares, „Energiatalgud,“ 01 2008. [Võrgumaterjal]. Available: http://www.energiatalgud.ee/img_auth.php/7/75/Vares,_V._Biomassi_tehnoloogiauuringud_ja_tehnoloogiate_rakendamine_Eestis._2008.pdf. [Kasutatud 26 05 2016].
- [14] „Estland energy trade,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://www.estland-energy.eu/est/straw_briquettes.php. [Kasutatud 26 05 2016].

- [15] Baltic Deal, Baltic Deal, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.pikk.ee/balticdeal/praktikad/Taimkate/?newsID=457>. [Kasutatud 26 05 2016].
- [16] „Säästlik ehitus,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://139359.edicypages.com/materjalid/soojustus> . [Kasutatud 26 05 2016].
- [17] R. Raigna, „Virumaa teataja,“ 02 06 2011. [Võrgumaterjal]. Available: <http://pluss.virumaateataja.ee/456696/kermo-jurmann-pohumaju-ehitatakse-jarjest-enam>. [Kasutatud 26 05 2016].
- [18] G. Pihl, „Panoramio,“ 2011. [Võrgumaterjal]. Available: http://www.panoramio.com/photo_explorer#view=photo&position=533&with_photo_id=59978794&order=date_desc&user=40555. [Kasutatud 26 05 2016].
- [19] T. Skøtt, „Inbiom,“ 08 2011. [Võrgumaterjal]. Available: http://inbiom.dk/Files//Files/Publikationer/halmpjeceuk_2011_web.pdf. [Kasutatud 26 05 2016].
- [20] J. Ahokas, „Energiatalgud,“ 2012. [Võrgumaterjal]. Available: http://www.energiatalgud.ee/img_auth.php/5/5a/Energia_pllumajanduses.pdf. [Kasutatud 26 05 2016].
- [21] EMÜ põllumajandus- ja keskkonnainstituut, „Energiatalgud,“ 2007. [Võrgumaterjal]. Available: http://www.energiatalgud.ee/img_auth.php/f/f8/Eesti_Maa%C3%BClikool._Rohetsete_energiakultuuride_uuringud._2007.pdf. [Kasutatud 26 05 2016].
- [22] BISYPLAN, „BISYPLAN,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://bisyplan.bioenarea.eu/html-files-es/02-02.pdf>. [Kasutatud 26 05 2016].
- [23] C. N. M. G. L. P. K. L. K. H. Lars Nikolaisen, Straw for Energy Production, Aarhus: The Centre of Biomass Technology, 1992.
- [24] L. M. Fetzer, „Extension,“ 24 09 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <http://articles.extension.org/pages/66577/preventing-fires-in-baled-hay-and-straw>. [Kasutatud 26 05 2016].
- [25] M. Hollis, „Google,“ 2005. [Võrgumaterjal]. Available: https://books.google.ee/books?id=z6uiZyz50RcC&pg=PA93&lpg=PA93&dq=transporting+straw&source=bl&ots=rye8aJJPqO&sig=MHSnHJU5bqPnslUmeOiP0gcCh_k&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwjvp7mb_ffMAhUpIMAKHZf4CW0Q6AEIPTAG#v=onepage&q=transporting%20straw&f=false. [Kasutatud 26 05 2016].
- [26] „Vidcenter,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://www.vidcenter.dk/gule%20halm%20haefte/Gul_Engelsk/halm-UK04.pdf. [Kasutatud 26 05 2016].
- [27] „Farm Machinery,“ 10 02 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.farmmachinery.co.uk/article/manitou-launches-mlt1040-high-lift-telescopic-loader/>. [Kasutatud 26 05 2016].
- [28] M. Matsalu, „Eprints,“ 2014. [Võrgumaterjal]. Available: http://eprints.ttk.ee/409/1/L%C3%B5put%C3%B6%C3%B6_Biok%C3%BCtused%20ja%20nende%20kasutus%20v%C3%A4ikekateldes_Marek%20Matsalu_2014.pdf. [Kasutatud 26 05 2016].

- [29] Estivo, „Pea,“ 2009. [Võrgumaterjal]. Available: http://pea.ee/files/6613/9773/1438/Misso_valla_uuring.pdf. [Kasutatud 26 05 2016].
- [30] M. Tooming, „Harjuelu,“ 30 05 2014. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.harjuelu.ee/2014/05/1994/lillis-valmib-pohupelletite-tehas/>. [Kasutatud 26 05 2016].
- [31] B. Zethræus, „BISYPLAN,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://bisysplan.bioenarea.eu/html-files-es/03-00.pdf>. [Kasutatud 26 05 2016].
- [32] „Estland energy,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://www.estland-energy.eu/est/straw_pellets.php. [Kasutatud 26 05 2016].
- [33] Straw Pellets, „Straw Pellets,“ 2010. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.strawpelletsltd.co.uk/straw-pellets.html> . [Kasutatud 26 05 2016].
- [34] Kinetic Biofuel, „Inbiom,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://www.inbiom.dk/Files//Files/Publikationer/Briquetted-Straw_Brochure_UK.pdf. [Kasutatud 26 05 2016].
- [35] „Biohansa,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.biohansa.ee/et/products/pohugraanulid/>. [Kasutatud 26 05 2016].
- [36] Ü. K. P. M. T. P. S. S. Villu Vares, „Energiatalgud,“ 2005. [Võrgumaterjal]. Available: http://www.energiatalgud.ee/img_auth.php/f/fa/Vares,_V._jt._Biok%C3%BCtuse_kasutaja_kasiraamat.pdf. [Kasutatud 26 05 2016].
- [37] J. T. A. H. L. K. Ülo Kask, „Riigiteataja,“ 2006-2007. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/aktulisa/4140/9201/2015/energiamaajanduse%20arengukava.pdf>. [Kasutatud 26 05 2016].
- [38] A. Paist, „ttu,“ 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.ttu.ee/public/m/Mehaanikateaduskond/Instituudid/soojustehnika-instituut/Katlatehnika.pdf>. [Kasutatud 26 05 2016].
- [39] A. Padari, H. Roostalu, M. Kriipsalu, A. Astover, R. Mitt, L. Pärn ja I. Melts, „Energiatalgud,“ 09 05 2016. [Võrgumaterjal]. Available: http://www.energiatalgud.ee/img_auth.php/2/29/MES_aruanne_biomass.pdf.
- [40] „Vikipeedia entsüklopeedia,“ 28 04 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <https://et.wikipedia.org/wiki/P%C3%B5levkivituhk>. [Kasutatud 26 05 2016].