EESTI MAAÜLIKOOL

Tehnikainstituut

Kristjan Rosenberg

BRIKETIMASINA ENERGIABILANSS

ENERGY BALANCE OF THE BRIQUETTING MACHINE

Bakalaureusetöö

Tehnika ja tehnoloogia õppekava

Juhendaja: lektor Mart Hovi, MSc

lektor Külli Hovi, MSc

Tartu 2016

www.emu.ee
Eesti Maaülikool
Estonian University of Life Sciences

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Bakalaureusetöö lühikokkuvõte	
Autor: Kristjan Rosenberg		Õppekava: Tehnika ja tehnoloogia	
Pealkiri: Briketimasina energiabilanss			
Lehekülgi: 55	Jooniseid: 14	Tabeleid: 8	Lisasid: 11
Osakond: Energeetika osakond Uurimisvaldkond: 4.17 Energeetikalased uuringud, T140 Energeetika Juhendaja(d): Mart Hovi, MSc; Külli Hovi, MSc Kaitsmiskoht ja aasta: Tartu 2016			

Töös antakse ülevaade Weima C-150 hüdraulilise briketimasina tööst erinevatest lähtematerjalide briketeerimisest. Töö tulemusi võrreldakse 2014. aasta katsetuste tulemustega.

Briketeerimine võimaldab ära kasutada põllumajanduses ja tootmises tekkinud jääke. Töö eesmärk on tutvuda briketimasina tööparameetritega. Briketimasina tööd uuriti võrguanalüsaatoriga Janitza UMG 605, millega kogutud andmeid töödeldi hiljem tabelarvutusprogrammiga. Briketeeritava toorme niiskust määrati kuivatuskapis temperatuuril 105 kraadi ning kaaluti kaaludega KERN 440-33N ja TSCALE.

Briketimasina tühijooksu ja briketeerimise ajal ei esinenud suurt erinevust võimsuste osas. Kaudsel meetodil arvutati kasutegur, milleks saadi ligikaudu 9 protsenti. Briketimasina kasutegur on väga madal, seega leiab töö autor, et selle tõstmise võimalusi oleks vaja edaspidi uurida.

Märksõnad: brikett, biomass, jäätmed, kütus, tihedus

www.emu.ee
Eesti Maaülikool
Estonian University of Life Sciences

Estonian University of Life Sciences
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014

Abstract of Master´s Thesis

Author: Kristjan Rosenberg

Specialty: Engineering and technology

Title: Energy Balance of the Briquetting Machine

Pages: 55	Figures: 14	Tables: 8	Appendixes: 11

Department: Institute of Technology
Field of research: 4.17 Energetic Research, T140 Energy research
Supervisors: Mart Hovi, MSc; Külli Hovi, MSc
Place and date: Tartu 2016

Thesis provides an overview of the work of Weima C150 hydraulic briquette press with various source materials. Test results are compared to similar results of 2014.

Briquetting allows the utilization of agricultural and production waste. The work aims to examine the operational parameters of briquetting machinery. The briquette press operations were measured by power quality analyzer Janitza UMG 605, which data was later used to process in spreadsheet program. The moisture levels of raw materials were measured in drying oven and weighing was carried out on scales KERN 440-33N and TSCALE.

Tests showed no significant power differences between no-load and briquetting operations of machinery. Indirect method was used to calculate efficiency ratio, which was approximately 9%. The efficiency for briquette press is very low, which is why the author believes that further research is required to improve the efficiency.

Keywords: briquettes, biomass, waste, fuel, density

SISUKORD

SISUKORD 4
TÄHISED JA LÜHENDID 6
SISSEJUHATUS 7
1. TAASTUVENERGIA 8
1.1. Energiatarbimine maailmas 8
1.2. Energiatarbimine Eestis 9
2. BIOMASS 10
2.1. Puit biokütuse lähtematerjalina 10
2.2. Teised biokütuste lähtematerjalid 11
2.3. Eestis toodetavad briketid 13
2.4. Brikettide hinnad Euroopas 13
3. BRIKETEERIMINE 15
3.1. Briketeerimise olemus 15
3.2. Tööpõhimõte 15
3.3. Tooraine ettevalmistamine ja briketeerimine 16
3.4. Transport ja ladustamine 17
4. KATSED WEIMA C-150 BRIKETIMASINAGA 18
4.1. Kasutatud seadmed 18
4.1.1. Briketimasin Weima C-150 üldiseloomustus 18
4.1.2. Mõõteseade Janitza UMG-605 19
4.1.3. Tarkavarapakett GridVis 20
4.2. Mõõteperiood 21
4.3. Tühijooksu katsed 21
4.4. Lehtede briketeerimine 23
4.5. Hakkpuidu briketeerimine 28
4.6. Kaera, saepuru ja õlitaime segu briketeerimine 31
4.6. Järeldused 34
KOKKUVÕTE 37
ENERGY BALANCE OF THE BRIQUETTING MACHINE 38

SUMMARY 38
KASUTATUD KIRJANDUS 40
LISAD 43
Lihtlitsents 55

TÄHISED JA LÜHENDID

m_{alg} – märja materjali algmass, kg;

$m_{lõpp}$ – kuiva materjali lõppmass, kg;

ρ – tihedus kg/m³;

m – briketi mass, kg;

τ – tootlikkus, kg/h;

t_1 – üks tund sekundites, 3600 s;

t_2 – briketeerimiseks kulunud aeg, s;

η – kasutegur, %;

$P_{koormus}$ – aktiivvõimsus koormuse olukorras, W;

$P_{tühijooks}$ – aktiivvõimsus tühijooksu olukorras, W;

T – ühe kilogrammi tootmiseks kulub energia, kWh/kg;

E – tarbitud energia, kWh;

W – tarbimisaine niiskus, %;

V – toorme mõõtmiseks kasutatud mahuti ruumala, m³;

SISSEJUHATUS

Antud töö annab ülevaate briketeerimisprotsessist ning briketimasina Weima C-150 tööst autori poolt tehtud katsete põhjal. Töö eesmärk on analüüsida briketimasina tööd nii tühijooksul kui tööolukorras.

Teema valiku tingis huvi tutvuda briketimasina tööga ning briketiseerimise teema aktuaalsus. Briketeerimine võimaldab põllumajanduses põllukultuuride töötlemisel tekkinud biomassjäätmete ökonoomse ärakasutamise: põlevatest töötlemis- ja puidujääkidest on võimalik peale tooraine kuivatamist valmistada briketti. Briketi puhul on olulised näitajad tihedus, küttevääртus, ruumi kokkuhoid ladustamisel. Briketi kvaliteet sõltub kasutatavast briketimasinast. Briketeerimisprotsessi loetakse suhteliselt energiamahukaks, kuid põhiline kulu tuleneb seadme töömehhanismi liigutamisest.

Töö koosneb teoreetilisest ja praktilisest osast. Teoreetilises osas antakse ülevaade taastuvenergiast, briketeerimise olemusest ja biokütuse lähtematerjalidest.

Praktilises osas on kasutatud Eesti Maaülikooli tehnikainstituudi hüdraulilist briketimasinat Weima C-150, võrguanalüsaatorit Janitza UMG 605, kaalu KERN 440-33N ning kaalu TSCALE. Andmete töötlemiseks kasutati tarkvara GridVis Basic, millega imporditi andmed MS Excelisse. Töös on mõõdetud järgmisi näitajaid: elektrivoolu, pinget, võimsustegurit ning aktiiv-, näiv- ja reaktiivvõimsust.

Katsete tegemisel kasutati briketeerimiseks ja energia mõõtmisteks 2015. aasta sügisel kogutud kase-, vahtra- ja tammelehti, mille niiskust määrati neljal korral kahenädalaste vaheaegadega. Mitmel korral briketeeriti hakkpuitu ning ühel korral kaera, saepuru ja õlitaime segu.

1. TAASTUVENERGIA

1.1. Energiatarbimine maailmas

Kuna maailma rahvastik kasvab kiiresti, siis nõudlus paindliku ja tõhusa energiavarustuse järele esitab energiatootjatele kriitilise väljakutse. Ülemaailmne energiatarbimine on tõusnud väga kiiresti, viimase kolme kümnendi jooksul ligikaudu kahekordselt. 2014. aastal tuleb primaarsest energiast umbes 86% fossiilsetest kütustest (32% nafta, 30% kivisüsi ja 24% gaas), 4,4% tuumakütusest ja ligikaudu 9,6% taastuvenergiast, millest põhiline tuleneb hüdroenergiast (7%) ning ülejäänud päikeseenergiast, biomassist ja biokütustest.. 2004. aastal oli fossiilsete kütuste osamäär 88%, mis on langenud 84% just biomassi ja biokütuste kasutuselevõtu kasvu tõttu. [1] Mõistlik oleks ära kasutada rohkem päikeseenergiat ja töötada välja põhjalik tehnoloogia biokütuste tootmiseks. 2005. aastal koristati maailmas 13 miljardit tonni biomassi, millest 82% olid toit ja sööt, bioenergia moodustas 11% ja biomaterjalid 7% [2]. Oluline on kasutada biomassjäätmeid energia tootmise eesmärgil.

Bioenergia on biomassist toodetud energia, näiteks soojus, elekter või biokütused. Taastuvenergia on ohutu energiaallikas, väikse negatiivse keskkonnamõjuga võrreldes taastumatute loodusvarade töötlemise tehnoloogiatega.[3] Rahvusvahelise projekti United Nations Sustainable Development Goals üheks eesmärgiks on suurendada 2030. aastaks taastuvenergia osakaalu maailmamajanduses [4]. Shell International ennustab, et taastuvenergia annab 2060. aastaks 60% maailma elektrienergiast [5]. Sellise eesmärgi poole liikumine seab teadlaste ette ülesande vastava tehnika väljatöötamiseks ja kasutusele võtmiseks.

Maailmas on kivisöeelektrijaamade arvestuslik koguvõimsus hetkel umbes 800 GW. Kui asendada 1% kivisütt biomassiga kõigis kivisöejaamades, peaks see andma teoreetiliselt väljundvõimsuse 8 GW energiat. CO_2 heitmed väheneks umbes 60 miljonit tonni võrra [6], mis on iseenesest väga oluline.

1.2. Energiatarbimine Eestis

Eestis on suur osatähtsus energia tootmisel kodumaistest energiaallikatest – eelkõige põlevkivist. Põlevkivist toodetakse umbes 82% kogu elektrienergiast. Eesti Statistika Aastaraamatu andmetel on põlevkivi tarbimine elektrijaamades lähiaastail vähenenud. Vahemikus 2013-2014 vähenes see 5% [7, lk 321]. Põlevkivi asemele otsitakse teisi lahendusi.

Koostootmisjaamades on puidutarbimine suurenenud alates 2009. aastast. Tänu sellele on umbes pool taastuvelektri kogutoodangust saadud biomassist. 2013. aastal vähenes puitkütuse tarbimine võrreldes varasema aastaga. Eestis jätkuv keskkonnaprojektide elluviimine on elavdanud jäätmekäitlust. See on kaasa toonud jäätmekütuse ja prügilates tekkiva biogaasi tarbimise kasvu. [7]

Eesti Taastuvenergia Koja (ETEK) poolt esitatud andmetel on Eestis nii palju biomassi, et sellest oleks võimalik jätkusuutlikult toota vähemalt 1/3 Eestile vajaminevast energiast. Hetkel toodetakse Eestis ligikaudu 35% soojusenergiast biomassist. ETEK info põhjal on võimalik toota kohalikust biomassist lausa 2/3 soojusenergiast. [8] Biomassi kasutuselevõtt on otstarbekas.

Suur osa raiutava küttepuidu ja puidutöötlemisjääkide primaarenergiast kasutatakse praegu igapäevaselt energia muundamise protsessides. Eesti Elektritööstuse Liit on sõlminud koostöökokkulepped erinevate metsaliitudega. Eesti metsanduse arengukavas seatud põhieesmärkide täitmiseks.[9] Selline koostöö aitab kaasa metsatööstuse potentsiaali kasvatamisele. Samas aitab see kaasa taastuvenergia osatähtsuse suurendamisele Eesti energiatööstuses.

2. BIOMASS

2.1. Puit biokütuse lähtematerjalina

Biokütuste tootmis- ja põletustehnoloogiad võimaldavad praegusel ajal efektiivselt ära kasutada praktiliselt kõiki metsa- ja puidutööstuse jäätmeid. Puidutöötlemisel tekib jäätmeid 35-40%, mööblitööstuses 60-70% ja vineeri tootmisel ligi 60%. Jäätmeteks loetakse ka koort, höövlilaaste ja saepuru. [10] Puidu põledes ja metsas mädanedes eraldub sama kogus CO_2 [11]. Kaasaegse tehnoloogia võimalusi arvestades tuleks maksimaalselt ära kasutada võimalikult palju puidujäätmeid.

Puitbriketi moodustavad tootmisjäätmed, mis on eelnevalt peenestatud ja kuivatatud ning seejärel pressitud kõrge rõhu all. Briketid on tihedad ja neil on korrapärane kuju. Puitbriketi läbimõõt ja küljepikkus on umbes 50-80 mm. [12] Puitbrikett on loodussõbralik kütus, kuna ta ei sisalda lisaaineid. Brikett on kõrge tihedusega ja kaal ulatub kuni 1t/m³ [13]. Ladustamisel võtab puitbrikett vähem ruumi kui toormaterjal. Toodetakse erineva kuju ja värvusega puitbrikette: neid on kandilisi ja ümaraid, heledaid ja tumedaid. Kandilist briketti on süüdata mõnevõrra raskem kui ümarbriketti, sest kandiline brikett on suurema tihedusega. Kandiline brikett põleb mahedama leegiga, kuid ümar annab kiiresti terava leegi. Briketi tume värvus tuleneb termotöötlusest, mis annab kõrgema küttevääртuse. Briketi värvus oleneb ka sellest, millisest puiduliigist brikett on valmistatud. [14] Puitbriketti on mugav kasutada näiteks kas või majapidamises.

Puitpelletiteks ehk graanuliteks nimetatakse kuivatatud ja peenestatud puidujäätmetest pressitud vääristatud peeneid pulki või kuubikuid. Pelleti läbimõõt on 6-10 mm, tema niiskus jääb alla 10%. Pelleti küttevärtus on kuni 5,0 MWh/t ning mahukaal 620-670 kg/m³. [15] Kasutust leiab pellet peamiselt kodumajapidamises, kuid ka tööstuslikes automaatsüsteemides [13]. Eesti energiaturul on viimasel viiel aastal olnud oluliseks kütuseliigiks puidugraanulid. Selle perioodi jooksul on nende toodang suurenenud üle kahe korra, võrreldes 2013. aastaga on see suurenenud 25%. 2014. aastal eksporditi üle 90% toodetud puidugraanulitest, sellest 54% Taani. Suuremad ekspordipartnerid olid Itaalia, Rootsi ja Inglismaa – igaüks ligi 8%-ga. [7, lk 322] Tabelis 2.1 esitatud uuringu tulemused erinevate biomassjäätmete võrdluse kohta põlevkivi tarbimisega näitavad, et põlevkivi

kasutamise maht on kõrge ning aastate lõikes suurenenud. Erinevate brikettide tarbimine on samuti veidi suurenenud, välja arvatud puitbrikett, mille tarbimine langes 2014. aastal. Kõige stabiilsemana on püsinud turbabriketi tarbimine.

Tabel 2.1. Erinevad biomassjäätmed ja võrdluseks põlevkivi tarbimine Eestis aastatel 2010-2014 (tuhat tonni) [7, lk 326]

Kütus	2010	2011	2012	2013	2014
Puidubrikett	46	45	21	31	18
Puidugraanulid	4	11	11	12	23
Turbabrikett	11	12	13	12	12
Põlevkivi	17888	18739	17527	20487	20629

Puusüsi on kõrge süsinikusisaldusega (80%) ja kõrge küttevääртusega (27-31 MJ/kg). Puusütt saadakse puidu kuumutamisel õhuvaeses keskkonnas. Puusöe tuhasus on 1-3% ning tema niiskus jääb alla 2,5%. [16] Puusões asetsevad süsiniku aatomid juhuslikult ning reageerides õhus hapnikuga CO_2-ks, hõõgub puusüsi tulipunaselt [17]. Puusütt kasutatakse peamiselt grillimiseks ja ka koldes.

2012. aasta statistikaameti energiabilansi analüüsi põhjal, moodustasid Eesti toodetud puitkütused 19,5% toodetud kütuste primaarenergiast ja nende tarbimine moodustas 14,2% sisemaisest kogutarbimisest. [7]

2.2. Teised biokütuste lähtematerjalid

Biomassina käsitatakse põllumajanduslikke tooteid, kaasa arvatud taimsed ja loomsed aineid, metsandusest saadud toodete, jäätmete ja jääkide ning tööstuse- ja olmejäätmete bioloogiliselt lagunevat fraktsiooni [18]. Kütusena leiab üha laiemat rakendamist ka rohtne biomass, näiteks õled. Teraviljapõhk omadused on sarnased puidu omadustega. 2007. aastal koristati Eestis esialgsetel andmetel 605 500 tonni teravilja, millest põhk moodustas

810 000 tonni. Heaks näiteks biomassi kasutajana on Tamsalu linn. Linnale hakkas 2007. aasta algusest lisasoojust tootma 850 kW põhukatel. [19] Heina on võimalik pressida nii brikettideks kui graanuliteks. Brikettide tihedused jäävad vahemikku 300-550 kg/m³ ja graanulitel vahemikku 450-750 kg/m³ [20]. Eestis on biokütuste kasutuselevõtt muutunud aktuaalseks teemaks.

Eestis toodetud turbabrikett on olnud aastatel 2010-2015 langustrendis, toodangu maht pole kasvanud [7].Turbabriketi ekspordi vähenemise põhjusteks on tootmise energiamahukus ja kitsas turg. Turbast toodab briketti hetkel ainsana OÜ Sangla Turvas. 1994. aastal maksis tonn briketti 25 eurot, 2014. aastal maksab 950 kg briketti umbes 100 eurot. Kütteturvast toodeti 2013. aastal 58% rohkem, turbabriketti 8% enam. Turbabriketi tootmist on pidurdanud ka keskkonnakaitsjad. Turba freesimist nimetatakse keskkonnavaenulikumaks kui põlevkivi kaevandamist. Freesimine hävitab seal varem kasvanud taimekoosluse. Turbaväljadelt freesitakse igal aastal umbes kümnesentimeetrine kiht. Sellist tehnikat kasutades saab ühte maardlat kasutada paarkümmend aastat. Tootma on hakatud tükkturvast, mille tonni hind on üle kahe korra madalam kui briketil. [21] Freesimise keskkonnavaenulikkuse tõttu turba kaevandamise laiendamiseks lubasid juurde ei anta.

Tükkturvast nimetatakse ökoloogiliselt puhtaks kütuseks. Tema headeks omadusteks on madal väävlisisaldus ja vähene tuhajääk. Tükkturvas saadakse turbamaardla pealiskihi freesimisel. Freesitud kihi paksus ja selle pööramine sõltub ilmastikuoludest. Freesitud kihi ümberpööramine võib toimuda umbes 1-3 korda. Tükkturvast kuivatatakse seejärel paar nädalat. Eesmärgiks on saavutada tükkide niiskuseks umbes 35%. Järgneb turba eemaldamine, rullides turvast spetsiaalsete masinatega. Peale kogumist veetakse turvas treileril teeäärsetesse aunadesse. Soodsate ilmastikutingimuste korral väheneb niiskus veel ligikaudu 5%. [22] See meetod erineb freesturba tootmise meetodist lühikese tehnoloogilise tsükli tõttu. Ühelt põllult on võimalik rohkem tükkturvast toota ning töömahukus on palju väiksem. Protsessi mehhaniseerimise tase on peaaegu 100%. [23] Hooaja toodang võib olla umbes kolme tootmistsükli korral 400 m³/ha ehk 160 t/ha aastas. Andmete järgi on Eesti kaetud 22% turbasoodega ja turbavaru on hinnanguliselt 950 miljonit tonni. [22] Tükkturba tootmine on odav ning inimene on töömahukatest operatsioonidest vabastatud.

2.3. Eestis toodetavad briketid

Eestis on brikettide ja pelletite tootjaid ligikaudu kakskümmend. Vaid üksikud tootjad on oma kodulehekülgedel ära näidanud brikettide omadused ja näitajad, siis on antud tabelisse välja valitud Briketipoisid OÜ, Tallinna Asalto OÜ kütteladu ja Leili Brikett OÜ (lisa 1). Sisse pole arvatud püsikliendi soodustusi ega allahindlusi, kasutatud on tavahindu. Briketipoisid OÜ-l ja osaliselt ka Tallinna küttelaol on oma kodulehel ära toodud olulised näitajad iga toote kohta:

- kütteväärtus MWh/t;
- tuhasus %;
- niiskus %.

Euroopas müüdavatele brikettidele on sätestatud nõuded klassifikatsiooni standardi CEN/TS 14 961 järgi. Toodetele on kindlaks määratud suuruse ja kuju mõõtmed. Arengumaade kontekstis võivad need nõuded olla samas liiga ranged. Norm pakub põhilise kvaliteedistandardi.[24] ning igal briketitootjal on vaja brikettide ja pelletite valmistamiseks sertifikaati.

2.4. Brikettide hinnad Euroopas

Brikettide hinnad on üldjuhul madalamad pelletite hindadest. Tabel 2.2. annab ülevaate puitbrikettide hindadest seitsmes Euroopa riigis 2014. aasta seisuga. Kõrgeim puubrikettide hind niiskusega alla 10% on Kreekas 342,85 eurot tonni kohta. Madalaim hind on dokumenteeritud Horvaatias: 133,75 eurot tonn. Eestis maksab tonn briketti keskmiselt 180 eurot [25], millest võib järeldada, et briketi hind Eestis on küllalt madal.

Tabel 2.2. Puubrikettide hinnad mõningates Euroopa riikides 2014. aasta seisuga [25]

Riik	Briketi tonni hind eurodes, €/t
Horvaatia	133,75
Sloveenia	212,00
Rumeenia	176,00
Saksamaa	303,50
Iirimaa	303,50
Kreeka	342,85
Austria	201,00

Pelletite (niiskus ≤10%) puhul on hindade erinevused riikide vahel tunduvalt väiksemad võrreldes brikettidega tabeli 2.3. põhjal. [25] Kõrgeim hind on jällegi Kreekas 347,57 € /t, järgneb Saksamaa 336,35 €/t ja Iirimaa 334,83 €/t. Madalaimad hinnad Euroopas on Rumeenias, Horvaatias ja Sloveenias, kus hinnad jäävad 250 € /t vahemikku. Eesti kuulub nende riikide hulka, kus pelletite tonni hinnad jäävad 250 euro juurde. Võrreldes eelmise aastaga on Sloveenias pelletite hinnad langenud ligikaudu 5%, Kreekas aga kasvanud 15% (tabel 2.3). Graanuleid müüakse tavaliselt 15 kilogrammistes kottides. Kotte võib osta üksikult, Graanuleid on võimalik osta ka ühetonnistel kaubaalustel. Antud tabelis toodud pelletite hindu ei saa võrrelda pelleti hindadega teistes Euroopa riikides, kuna juurde pole arvestatud käibemaksu. Mõned Euroopa Liidu riigid rakendavad puitkütusele madalamat käibemaksu, võrreldes fossiilsete kütustega. [25]

Tabel 2.3. Pelletite hinnad mõningates Euroopa riikides 2014. aasta seisuga [25]

Riik	Pellet, tonni hind eurodes, €/t
Kreeka	347,57
Saksamaa	336,35
Iirimaa	334,83
Rumeenia	234,36
Horvaatia	250,00
Sloveenia	263,34

3. BRIKETEERIMINE

3.1. Briketeerimise olemus

Tuhandeid aastaid oli biomass ainuke püsiv ja kõige kergemini kontrollitav energiaallikas. Puidust saadi põhiline energia kuni 19. sajandi keskpaigani. Olulist rolli mängisid ka vee- ja tuuleveskid varajasel tööstuskasvul. Kivisüsi muutus valitsevaks energiavormiks 19. sajandi lõpus. 20. sajandi keskpaigast alates on valitsevaks energiavormiks olnud nafta, kasvanud on maagaasi tarbimine. [26] Siit järeldus, et ressursside tarbimine energiaühiku kohta (mass või maht) on pidevalt kasvanud. Peaaegu kõik energiaallikad, fossiilkütused, tuul või biomass, on ajendatud päikeseenergia poolt. Kui jätkusuutlikult majandada ehk kui tarbimine ei ületa juurdekasvu, siis biomass on taastuvenergia. Päikeselt saadud energia muudetakse fotosünteesi käigus taimedes keemiliseks energiaks. Taimed muutuvad inimestele söödavaks või omadustelt selliseks, et neid saab põletada. Pressimine ongi protsess, mille käigus parandatakse biomassi omadusi taastuvast energiaallikast tihendamise käigus. [26]

Eesti kliimas kulub kütmisele ühe ruutmeetri kohta ligikaudu 170 kWh energiat aastas. Vesikeskküttesüsteemiga 150 m² elamu puhul, milles on kaasaegne nõuetele vastav soojusisolatsioon, on välja toodud kuue erineva kütuse võrdlus (lisa 2.) [27]. Kõige kallim on kütmine kütteõli ja elektriga. Madalama hinnatasemega on puitbrikett, millele järgnevad kuiv küttepuu ja pellet.

3.2. Tööpõhimõte

Peale tihendamist ja töötlemist saavutatakse briketi kõrgem energiasisaldus mahuühiku kohta. Paranevad ka teised näitajad. Briketeerimine ja pelletiseerimine põhinevad tihendamisel ja omavad teatud eeliseid töötlemata toorainega võrreldes [28]:

- niiskustase väheneb, seega suurem stabiilsus säilitamisel (biolagunemine);
- võimalus kasutada lisandeid, et parandada veelgi briketi omadusi;
- vähem tolmu valmistoote käitlemisel;
- materjal muutub homogeensemaks;
- briketti saab toota erineva kujuga ja suurustes.

Tihendamist kas ilma või koos sideainega. Sideaine eesmärgiks on siduda pressitav materjal nii, et see peale pressimist ära ei laguneks. Üldiselt ei kasutada ega lisata enne pressimist sideaineid. Enamik puidujäätmeid ei vajagi sideaineid, sest kõrgel temperatuuril vabanev ligniin, puidu looduslik liimaine, seob tooraine briketiks. [29] Ligniin on termoplastne aine, mis tähendab seda, et külmana on ta kõva, kuid soojenedes pehmeneb. See tagab näiteks puidule ka veel plastse painutamise [30].

3.3. Tooraine ettevalmistamine ja briketeerimine

Tooraine on alati mingi valmistoote etapp väärtusahelast. Briketeerimise juures on oluline see, mida briketeeritakse ja kuidas saadakse tooraine. Põhimõtteliselt sobib igasugune biomass tootmaks kütust. Sageli on tooraine peale kogumist märg, seega tuleks pressimiseks mõeldud materjal eelnevalt kuivatada. Briketeerimiseks sobiv niiskustase on ligikaudu 15%. [28] Liigniiske materjal ei jää peale pressimist hästi kokku ning hakkab pärast lagunema.

Haruldane vaatepilt on see, kui mingit põllukultuuri kasvatakse spetsiaalselt briketeerimiseks. Tavaliselt rakendatakse briketeerimist mingi kindla materjali omaduse parandamiseks, et seeläbi anda lisaväärtust halva kvaliteediga tootele, peamiselt põllumajanduslikele jääkidele. Põlemisomadusega, kuid mugava või esindusliku välimuseta materjal sobib väga hästi briketeerimiseks.[28] Biomassi briketeerimisega laheneb probleem, kuidas panna suur hulk jäätmeid, mis tekivad põllukultuuride töötlemisel, täitma mõnd kasulikku otstarvet. Edukalt briketeeritakse ülemaailmselt džuuti, riisi ja kohviubade kesti, lutserni, pähklikoori, sõnnikut, vanapaberit, kivisütt, kalajäätmeid, oksi, kookospähkli puru, puuvilla, kanepit ja muid toiduainete töötlemise

käigus tekkinud jääke. Soovitatav on ka kasutada briketi tootmisel toorainete segusid. Briketeeritav tooraine tuleb tükeldada, purustada või jahvatada, et briketimasin oleks võimeline seda töötlema ilma tõrgeteta. [29]. Briketeerimise juures on oluline see, mida briketeeritakse ja kuidas saadakse tooraine. Põhimõtteliselt sobib igasugune biomass tootmaks kütust. Sageli on tooraine peale kogumist märg, seega tuleks pressimiseks mõeldud materjal eelnevalt kuivatada. Briketeerimiseks sobiv niiskustase on ligikaudu 15%. [31] Liigniiske materjal ei jää peale pressimist hästi kokku ning hakkab pärast lagunema.

Tööstuses tekkinud jääke peetakse sageli väärtusetuteks. Praktikas ei ole mõistlik eeldada, et kõik jäägid on nii nimetatult ilma hinnata selles mõttes, et neil puudub alternatiivne kasutusviis. Kõik, millel on olemas kasutusala, omab ka rahalist väärtust. Heaks näiteks on jällegi briketid. Raske on tänapäeval leida sellist briketitööstust, kes ei pea briketiks tehtavate jäätmete eest maksma. Põllumajandusjääke „ära andev“ põllumees küsib tema jäätmetelt kasumit teenijatelt oma osa. [31] Töötlemisjääke ja puitu on võimalik briketiseerida.

3.4. Transport ja ladustamine

Üldjuhul on põllumajandusjäägid mahukad. Pallpakendis nisukõrte tihedus on ligikaudu 100 kg/m^3. Peenestatud ja purustatud puuvillajääkidel on puistetihedus kõige rohkem 130 kg/m^3. Seevastu virnastatud puidu puistetihedus on üle 500 kg/m³. See tähendab seda, et põllumajandusjääkide transport briketitehasesse võib muutuda väga kulukaks nende kahe asukoha vahemaa kasvades [31].Tahkeid biokütuseid tarnitakse veoautodega, konteinerites või järelhaagisega traktoritega. [8] Kohaletoimetamise eest vastutab üldjuhul tarnija.

Enamik jääke tekib mingi kindla perioodi vältel aastas ning nende vedu nõuab hooajalisi transpordivahendeid (traktorid, haagised jne) ja samuti suuri ladustamisvõimalusi. 400 tonni pakendatud õlgede panipaigaks oleks vaja umbes 4000 m^3 ehk hoone suurus peaks olema 30 korda 30 meetrit ja kõrgus 4 meetrit [31].

4. KATSED WEIMA C-150 BRIKETIMASINAGA

4.1. Kasutatud seadmed

Töös kasutati hüdraulilist briketimasinat, mis asub Eesti Maaülikooli tehnikainstituudi garaažis. Seade saab toite ABB jõupindpesast, millel on kaitseaste IP44, mis tagab tolmu ja niiskuskaitse. Masina töö parameetreid jälgiti Janitza võrguanalüsaatoriga. Andmeid töödeldi kasutades vabavaralist tarkvarapaketti GridVis. Brikettide kaalumiseks kasutati kahte erinevat kaalu KERN 440-33N mõõtepiirkonnaga 1000 grammi, mõõtetäpsusega 0,01 grammi ja kaalu TSCALE mõõtepiirkonnaga 60 kilogrammi ja mõõtetäpsusega 0,01 grammi. Järgnevalt on ära toodud kõik bakalaureusetöös kasutatavad seadmed:

- briketimasin Weima C-150;
- võrguanalüsaator Janitza UMG 605;
- kaal KERN 440-33N;
- kaal TSCALE.

4.1.1. Briketimasin Weima C-150 üldiseloomustus

Käesolevas töös kasutati Saksamaal toodetud briketimasinat Weima C-150 (lisa 3.). Masin asub ühes Eesti Maaülikooli tehnikainstituudi garaažides. Weima tegeleb briketimasinate ja masinatega, mis purustavad briketeerimiseks kasutatavat materjali, tootmisega.

Tegemist on hüdraulilise briketimasinaga, millel on kõrge jõudlusega ning kulumiskindel pressimismehhanism. Hüdroajam koosneb töövedeliku paagist, hüdrosilindrist, hüdromootorist ja õlijuhtmetest. Jaotus- ja reguleerimisseadmetest on masinal klapid, regulaatorid, survereleed, jaotussiibrid, kraanid. [32] Masina tööpinge on 400 V, voolutarve on ligikaudu 15 A. Seadmel on vastupidav disain, hooldustase on madal, ta on kompaktne ruumi nõuetele. C-seeria masinad on ideaalsed väikse kuni keskmise suurusega ettevõtetele, kus läbilaskevõime ei ületa 50-80 kg tunnis või ligikaudu 200-400 kg päevas.

Praktiliselt mistahes sobivast materjalist vormib masin briketi. Tootja toob enda kodulehel välja, et C- seeria briketimasinatega on võimalik kasutada veel vahtplasti ja paberit. Antud seeria briketimasin on mõeldud töötlema peamiselt saepuru ja muud biomassi. [33] Olemas on briketi pikkuse kontroll, millega tagatakse töö käigus kõikidele brikettidele ühesugused mõõtmed. Süsteem on varustatud temperatuuri-, rõhu- ja asendianduritega. SPS (Standby Power Supply) tagab mingi vea või häire korral masina väljalülitumise, lülitudes ooterežiimile [34]. Mahuti, kuhu läheb tooraine, on kuubikujuline, mille serva pikkus on üks meeter, seega mahuühikuks 1 m³. Pressimiskambrisse liigub tooraine kruvi etteande ja agitaatori abil.

Tabel 4.1. Weima C-150 tehnilised andmed [33]

Tehnilised andmed	Weima C-150
Briketi diameeter [mm]	50
Tootlikkus [kg/h]	50
Hüdraulilise mootori võimsus [kW]	5,5
Õli mahutavus [l]	100
Ligikaudne kaal [kg]	800

Tootlikkus sõltub materjalist, eeltingimusega, et niiskus ≤18% (tabel 4.1).

4.1.2. Mõõteseade Janitza UMG-605

Antud töös kasutati briketimasina töö uurimiseks mõõteseadet Janitza UMG-605 (lisa 4.). Seade on toodetud Saksamaal. Tegemist on kolmefaasilise energiakvaliteedi analüsaatoriga. Seadme abil on tagatud asjakohane pidev järelevalve ja integreeritud mõõteseadmestiku energiajuhtimine vastavalt standardile ISO 50160 (toite pinge, voolu, sageduse, tarbitud aktiiv- ja reaktiivenergia, aktiiv- ja reaktiivvõimsuse mõõtmine ning arvutamine). [34] Garanteeritud on toitekvaliteedi (harmoonilisus, värelus, pingelohud

jne) ja lekkevoolu juhtimine (RCM - *residual current monitoring*). [35] Kõik mõõteandmed loetakse andmebaasi ning seda on mugav töödelda ühtse tarkvaraga. Selline lahendus lihtsustab liidestamist, kuna ongi ainult üks süsteem ja ei ole vaja muid lisaliideseid. Mõõteseade ühendati töö autori sülearvutiga CAT5 võrgukaabli pesa abil.

Briketimasina elektrisüsteem on kolmefaasiline. Elektrikilp asus masina kõrval oleval laual. Mõõteseade tarbib 230V vahelduvvoolu. Elektrikilp oli piisavalt suur, mahutamaks mõõteseadet ja tema kolme voolutrafot. Pingetus olukorras ühendati voolutrafod faasijuhtmetele (lisa 4). Pärast mõõtmisi demonteerimisel toimiti järgmiselt: pingetus olukorras ühendati mõõteseade elektrikilbist lahti ning faasijuhtmete pikendused eemaldati.

4.1.3. Tarkavarapakett GridVis

Töös kasutati andmete töötlemiseks tarkvara GridVis Basic (lisa 5.), mis võimaldas kasutada ühte seadet korraga ühes arvutis. Andmed oli võimalik programmiga importida MS Excelisse, mis tegi andmete töötlemise mugavaks. Seadme abil mõõdeti järgmisi näitajaid:

- vool I, *A;*
- pinge U, *V;*
- aktiiv-, näiv-, reaktiivenergia *E*, Wh;
- aktiiv-, näiv-, reaktiivvõimsus *P*, W;
- võimsustegur $cos\varphi$.

Janitza võrguanalüsaatori mõõtmiste tulemuste transportimiseks arvutisse tuli esmalt ühendada mõõteseade kohtvõrku ning siis kasutada arvutis tarkvarapaketti GridVis. UMG 605 võimaldas ka reaalajas andmete monitoorimist läbi sisseehitatud veebiserveri. Mõõdeti aktiiv-, näiv- ja reaktiivvõimsusi ja energiaid. Samuti uuriti pingeid ja voole erinevate katsete puhul. Gridvis mõõtis ettenähtud parameetreid iga sekundi tagant.

4.2. Mõõteperiood

Briketimasinaga alustati katsetusi 2015. aasta detsembrikuus. Enne mõõteseadmete kasutuselevõtmist briketeeriti kolmel korral proovipartiid ning tutvuti masina tööga juhendaja instrueerimisel. Kolmel korral teostati tühijooksukatsed, mida juba mõõdeti.

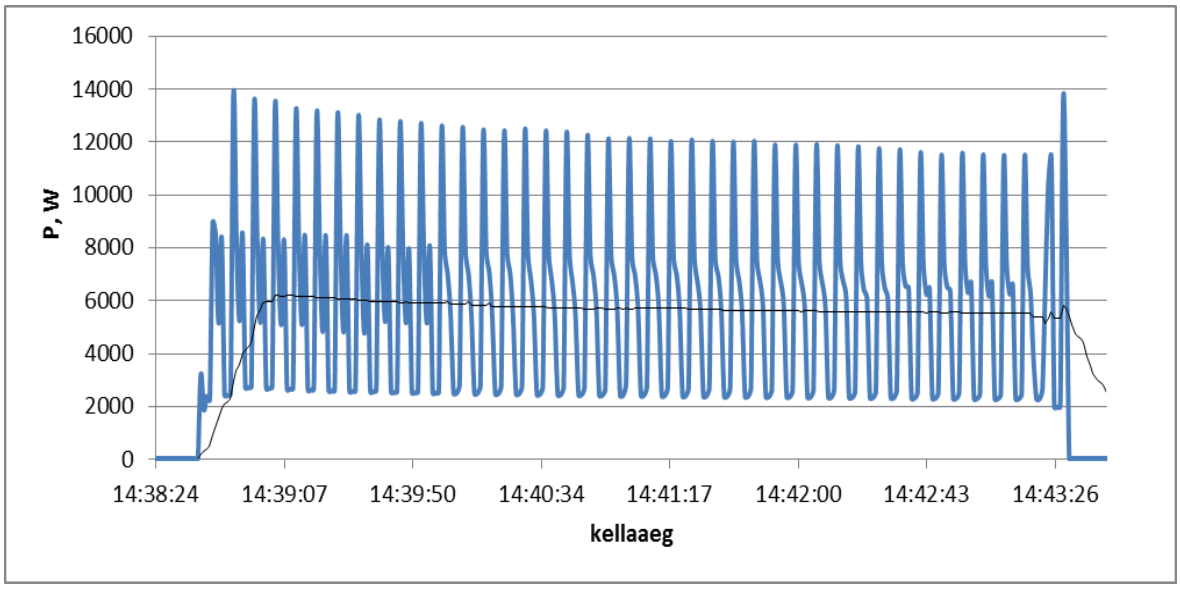
Peaeesmärgiks oli proovida briketeerida Eesti Maaülikooli ümbruskonnast 2015. aasta sügisel kogutud puude lehti. Nende hulka kuulusid kase-, vahtra- ja tammepuu lehed. Vähesel määral leidus riisumise käigus nende hulka sattunud sammalt. Puude lehti kuivatati Eesti Maaülikooli tehnikainstituudi viiendal korrusel ligikaudu neli kuud. Lehtede niiskust mõõdeti neljal korral kahenädalaste vaheaegadega.

Mitmel korral briketeeriti hakkpuitu ja ühel korral kaera, saepuru ja õlitaime segu, millele teostati mõõtmised (lisa 6.). Tooraine mass ja brikettide mass kaaluti iga katse puhul.

Briketeerimise aeg sõltus briketeeritava toorme kogusest ja materjalist. Briketeerimisel jälgis töö autor pidevalt reaalajas andmeid, vajadusel vahetati kotte, kuhu brikett peale pressimist kukkus (lisa 7.), tõrke korral taaskäivitati masin ja vajadusel aidati käsitsi etteandele kaasa, liigutamaks toorainet teole. Ühe briketeerimise aeg varieerus 1,5-4 tunni vahel.

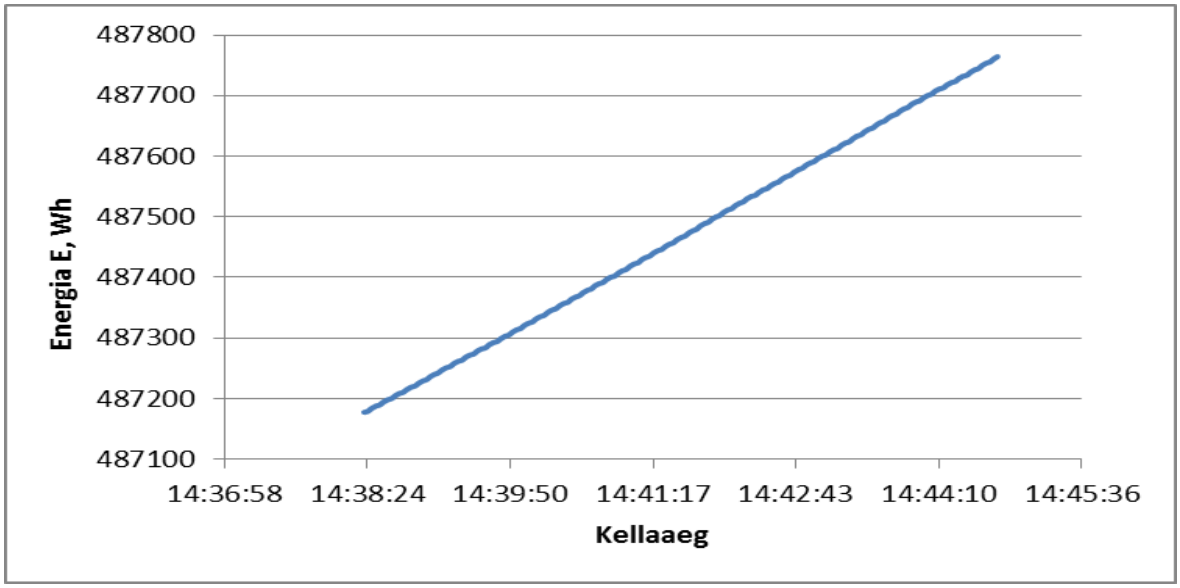
4.3. Tühijooksu katsed

15. detsembril 2015. aastal teostati esimene mõõtmine võrguanalüsaatoriga tühijooksu olukorras. Tühijooksu aritmeetiline keskmiseks saadi 4352,834 W (joonis 4.1). Tühijooks kestis 6 minutit ja 23 sekundit. Kui Weima C-150 briketimasin tuvastab, et mingi aja jooksul pole toorme etteannet, lülitub ta välja.



Joonis 4.1. Võimsuse sõltuvus ajast

Tühijooksul tarbis briketimasin 6 minuti ja 23 sekundi jooksul 578,843Wh energiat (joonis 4.2).



Joonis 4.2. Tarbitud aktiivenergia sõltuvus ajast

Jooniselt 4.2. on näha, et energia kulu on ajas lineaarne.

4.4. Lehtede briketeerimine

Tooraine briketeerimiseks koguti puude lehti Eesti Maaülikooli ümbruskonnast 2015. aasta sügisel. Lehed kuivasid tehnikainstituudi viiendal korrusel ligikaudu neli kuud (lisa 8). Niiskuse kontrollmõõtmised teostati neljal korral, eesmärgiga saavutada niiskus alla 10% (joonis 4.3). Niiskus vähendab küttevääртust, suurendab põlemisgaasi mahtu ja halvendab süttimist. Niiskuse leidmiseks võeti prooviks ligikaudu 60-80 grammi lehti ning asetati need kuivatuskappi ligikaudu 24 tunniks. Kuivatamine toimus seal ringleva õhuga 100-105 °C juures. Seejärel kaaluti lehtede mass uuesti (tabel 4.2). Niiskuse arvutamiseks kasutati valemit:

$$W = \frac{m_{alg} - m_{lõpp}}{m_{lõpp}} \cdot 100\%, \qquad (1.1.)$$

kus $W -$ tarbimisaine niiskus, %

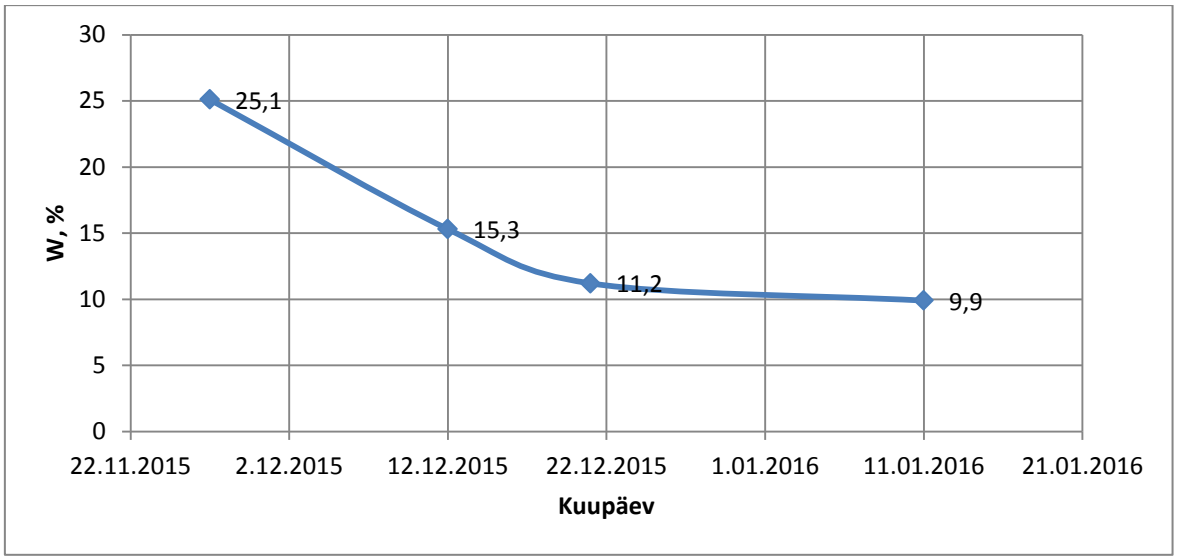
$m_{alg} -$ märja materjali algmass, kg

$m_{lõpp} -$ kuiva materjali lõppmass, kg

Tabel 4.2. Mõõteandmed lehtede niiskuse kohta

Kuupäev	märja materjali algmass, kg	kuiva materjali lõppmass, kg	tarbimisaine niiskus, %
27.11.2015	64,79	51,8	25,1
12.12.2015	67,32	58,39	15,3
21.12.2015	74,33	66,85	11,2
11.01.2016	74,32	68,1	9,9

Lehti võeti igaks prooviks lehehunniku erinevatest kohtadest ja kihtidest, seega ei ole lehtede niiskuseprotsendid kõrge täpsusega.



Joonis 4.3. Lehtede niiskuseprotsendi muutus ajas

Lehed transporditi tehnikamaja viiendalt korruselt garaaži, kus asus briketimasin, käsitsi umbes 100 liitristes prügikottides (lisa 9). Ühe prügikoti kaal koos lehtedega oli ligikaudu 2,5 kilogrammi ning kokku oli 15 kotti, millest kaks jäi pressimisest välja.

4. jaanuaril sooritati proovipartii lehebrikettide pressimiseks, et näha, kuidas tulemus peale pressimist välja näeb ja kas üldse moodustub brikett.

Päev hiljem täideti briketimasina mahuti ääreni, mis tähendab, et briketeeritava materjali kogus oli 1 m³ (lisa 10). Tooraine massiks oli 32,5 kg, seega mahumassiks on 32,5 kg/m³ kohta.

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{32{,}5\ kg}{1\ m^3} = 32{,}5\ \text{kg/m}^3, \qquad (1.2.)$$

Kus ρ on tihedus kg/m³;

m – briketi mass, kg;

V – toorme mõõtmiseks kasutatud mahuti ruumala, m³.

Kogu protsessiks kulus aega 1 tund 7 minutit ja 56 sekundit. Briketeerimise tootlikkus on 28,7 kg/h ning see on leitav ristkorrutisega:

$$\tau = \frac{t_1 \cdot m}{t_2} = \frac{3600\ s \cdot 32{,}5\ kg}{4076\ s} = 28{,}7\ kg/h, \qquad (1.3.)$$

kus τ on tootlikkus, kg/h

t_1 on üks tund sekundits, s

t_2 - briketeerimiseks kulunud aeg, s

m – briketi mass, kg.

Tarbitud aktiivvõimsuse keskmine on 4778,303 W. Tühikäigul on elektriline võimsus 4352,834 W - erinevus on seega 425,469 W (joonis 4.4).

Kasutegur kaudsel meetodil avaldub:

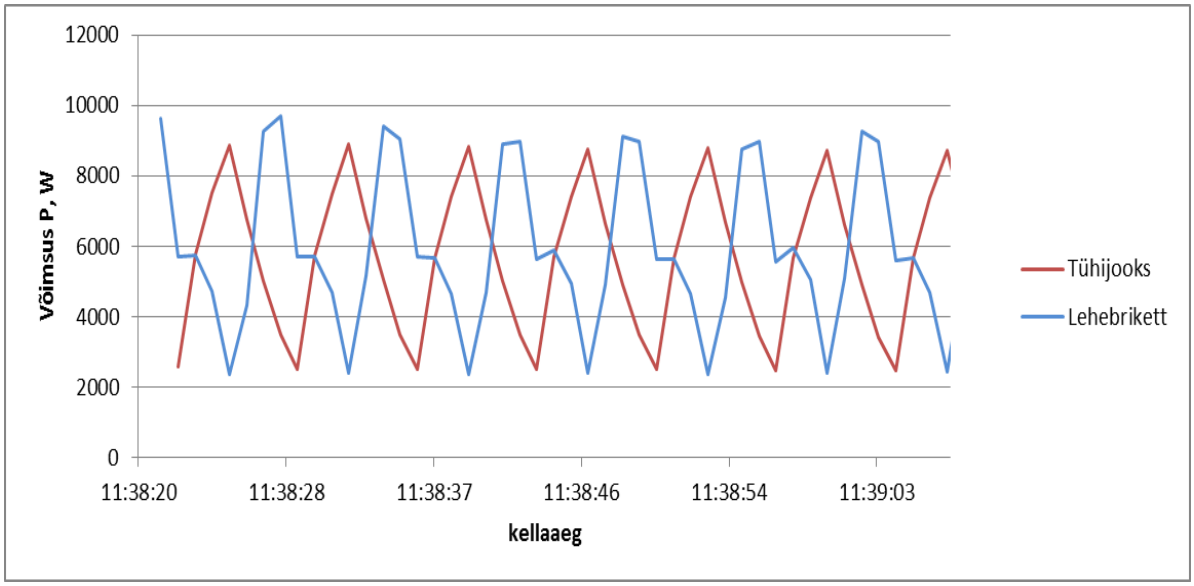
$$\eta = \frac{P_{koormus} - P_{tühijooks}}{P_{koormus}} \cdot 100\% = \frac{4778{,}303 - 4352{,}834}{4778{,}303} \cdot 100 = 8{,}904\ \% \quad (1.4.)$$

kus η - kasutegur, %

$P_{koormus}$ – aktiivvõimsus koormuse olukorras, W

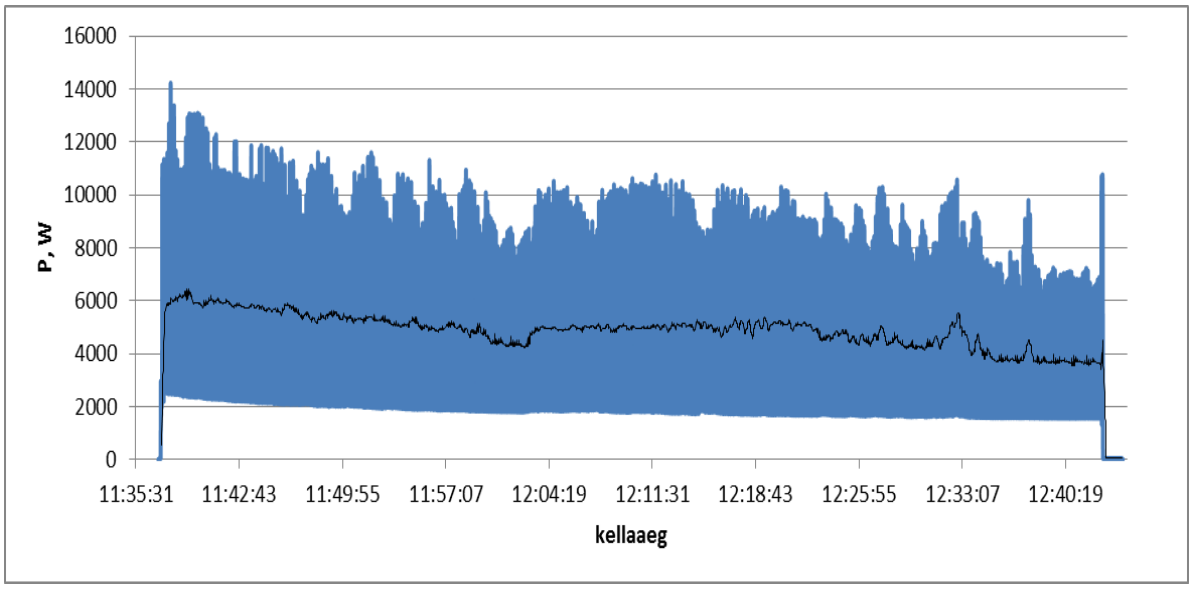
$P_{tühijooks}$ – aktiivvõimsus tühijooksu olukorras, W

Briketimasina kasutegur lehtede briketeerimisel oli 8,904 %. Suur hõõrdumine, mis kaasneb briketimasina tööga, tingib briketimasina madala kasuteguri (ligikaudu 10%).



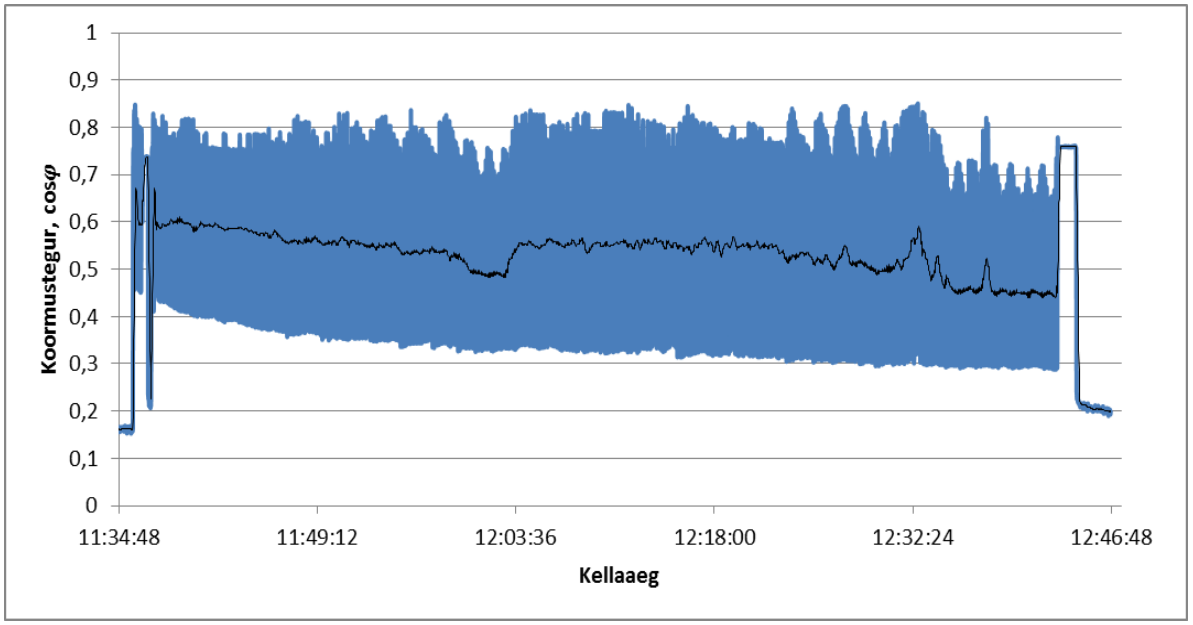
Joonis 4.4. Keskmistatud võimsused lehebriketi tootmisel ja tühijooksu olukorras

Võimsuste keskmiste väärtuste kõverad ühe minuti kestel on väga sarnased ning erinevus tühijooksu katsel ja lehebriketi tootmisel on väike (joonis 4.5).



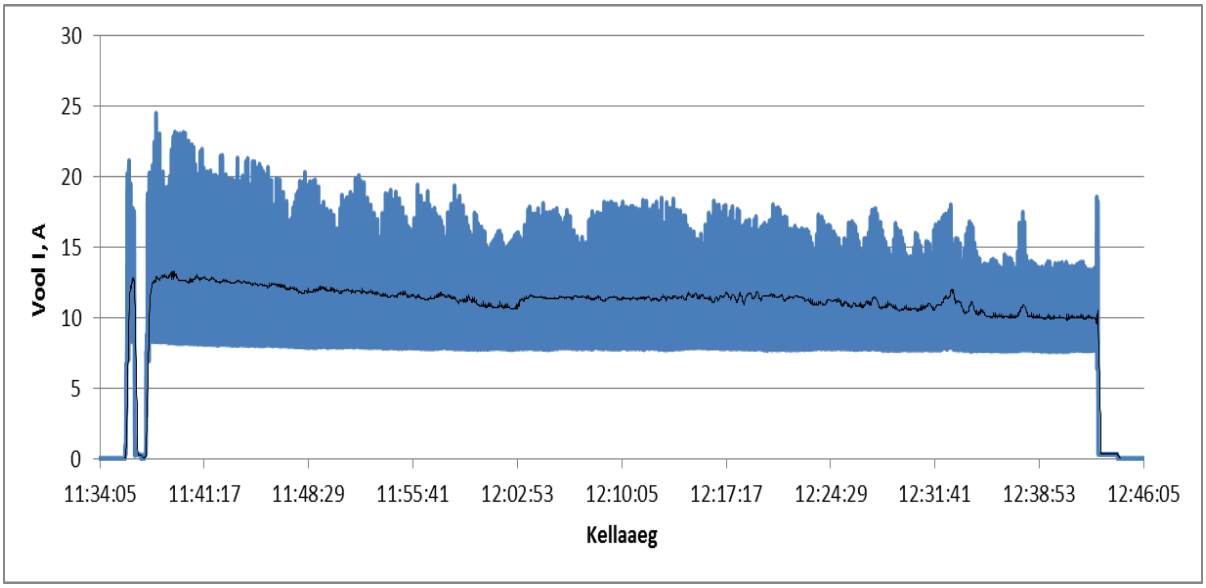
Joonis 4.5. Aktiivvõimsuste sõltuvus ajast ning jooksev keskmine

Võimsustegur mängib suurt rolli elektrienergia ülekandel (joonis 4.6). Mida kõrgem võimsustegur, seda efektiivsemalt kasutatakse ära elektrienergiat. Katse puhul on võimsustegur umbes 0,5.



Joonis 4.6. Võimsustegur cosφ sõltuvus ajast ning jooksev keskmine

Weima on toonud oma kodulehel välja, et keskmine voolutarve briketimasinal C-150 on keskmiselt ligikaudu 15A. Katseandmetega kontrolliti selle õigsust. Keskmine voolutarve katsel oli 11,35 A (joonis 4.7), mis ei ületa briketimasina tehnilistes andmetes toodud väärtust.



Joonis 4.7. Voolutarve sõltuvus ajast ning jooksev keskmine

Ligikaudu poolteisetunnise lehebriketi tootmisel tarvitati 4,94 kWh energiat (joonis 4.8).

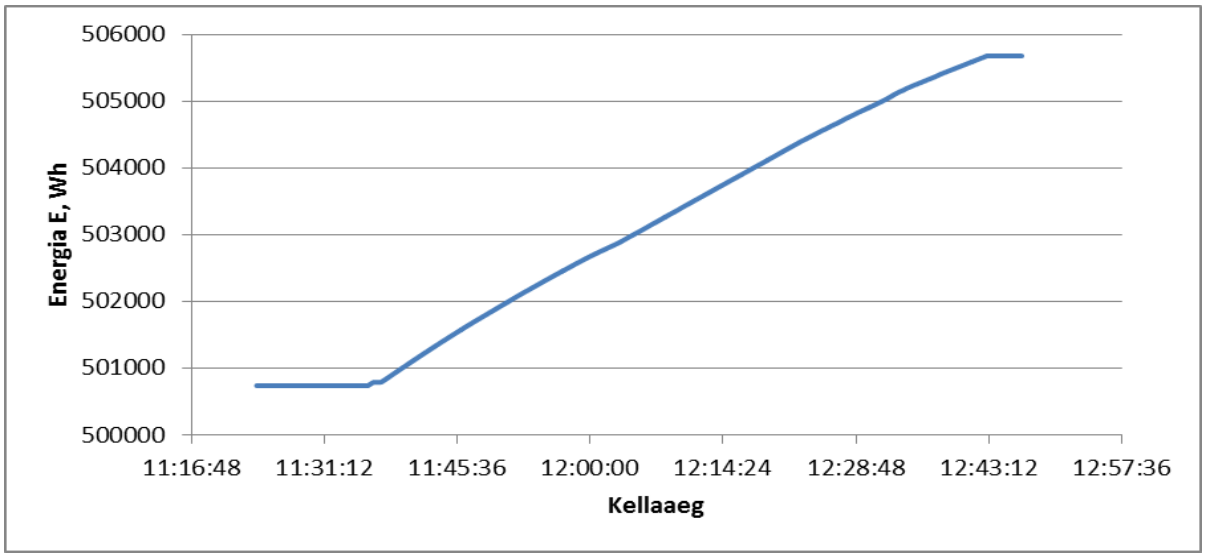
Tunnise briketeerimiseprotsessiks kulus 4,94 kWh energiat. Seega ühe kilogrammi briketi tootmiseks kulus:

$$T_1 = \frac{E}{m} = \frac{4{,}94\ kWh}{32{,}5\ kg} = 0{,}152\ kWh/kg, \qquad (1.5.)$$

kus T on ühe kilogrammi tootmiseks kulub energia, kWh/kg;

E – tarbitud energia, kWh;

m – briketi mass, kg.



Joonis 4.8. Tarbitud aktiivenergia sõltuvus ajast

Pärast briketeerimist teostati kaalumised brikettidele. 20 liitrine pang mahutas 11,28 kg briketti, ehk tihedus on ligikaudu 564 kg/m³:

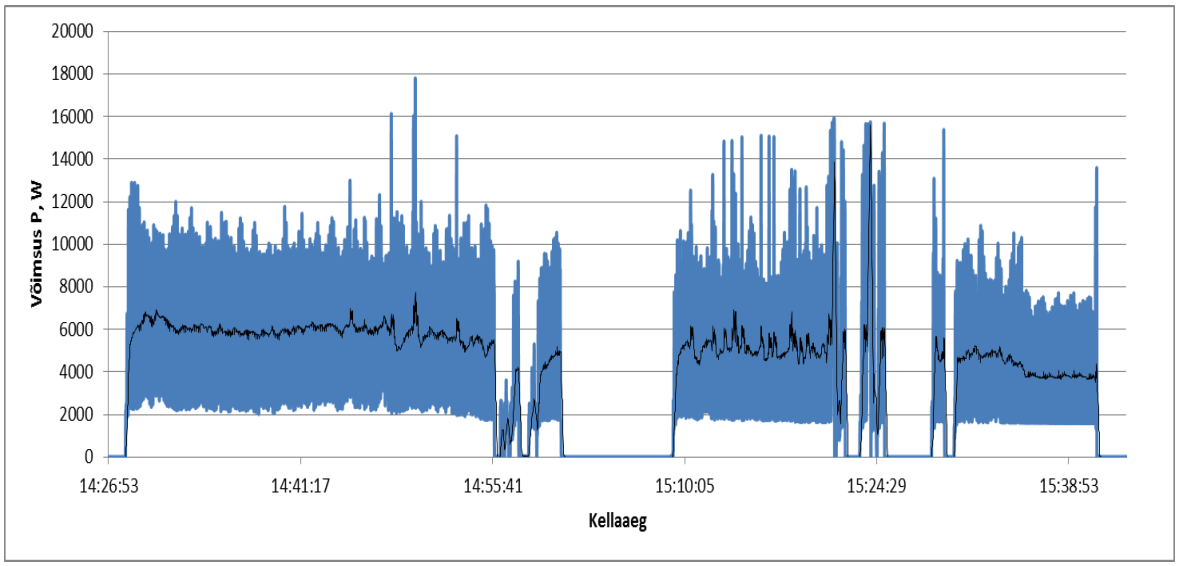
$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{11{,}28\ kg}{0{,}02\ m^3} = 564\ kg/m^3 \qquad (1.6.)$$

Enne briketeerimist oli lehtedel tihedus 32,5 kg/m³, seega suudeti toorainet tihendada umbes 17,4 korda (lisa 11).

4.5. Hakkpuidu briketeerimine

Kuusepuust hakkpuidu briketeerimine toimus 15. detsembril 2015. aastal. Hakkpuidu niiskus oli enne hinnanguliselt ≤ 20%, kuna see oli kuivas keskkonnas kaua seisnud. Hakkpuidu briketeerimisel oli peamine probleem see, et toorme suurus oli vastava briketimasina jaoks ebasobivas mõõdus, mis jäi etteandekruvisse pidevalt kinni ning masin kuumenes üle. Seega tuli masin vooluvõrgust välja lülitada ning puhastada etteandekruvi silinder.

Kogu katse aktiivvõimsuse keskmine oli 2344,41 W, aga kui jätta välja briketimasina kinni kiilumised, siis tarbiti 4738,52 W (joonis 4.9). Kogu katse kestvus oli 2 tundi 10 minutit ja 36 sekundit. Ainult briketeerimisele kulus 1 tund 1 minut ja 12 sekundit.

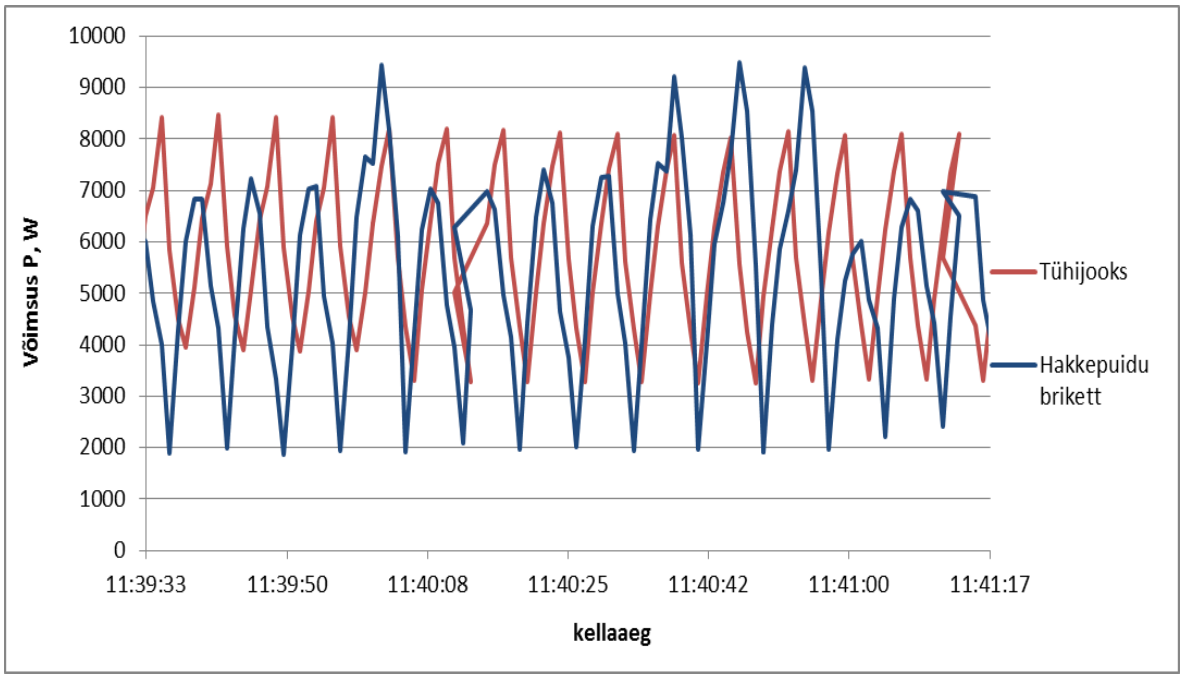


Joonis 4.9. Aktiivvõimsuse sõltuvus ajast terve katse jooksul hakkpuidu briketeerimisel ning jooksev keskmine

Briketimasina hooldamisele läks natuke üle ühe tunni. Võimsuste erinevus tühijooksuga on 385,69 W (joonis 4.10).

$$\eta = \frac{P_{koormus} - P_{tühijooks}}{P_{koormus}} * 100\% = \frac{4738{,}52 - 4352{,}83}{4738{,}52} * 100\% = 8{,}14\ \%, \qquad (1.7.)$$

Kasutegur kaudselt meetodil on 8,14 %, mis on natuke madalam kui lehtede katse puhul.



Joonis 4.10. Keskmistatud võimsused hakkpuidubriketi tootmisel ja tühijooksu olukorras

Briketeeritav kogus oli 44,64 kilogrammi, seega hakkpuidu katse tootlikkus on 43,8 kg/h:

$$\tau = \frac{t_1 * m}{t_2} = \frac{3600\ s * 44{,}64\ kg}{3672\ s} = 43{,}8\ kg/h, \quad (1.8.)$$

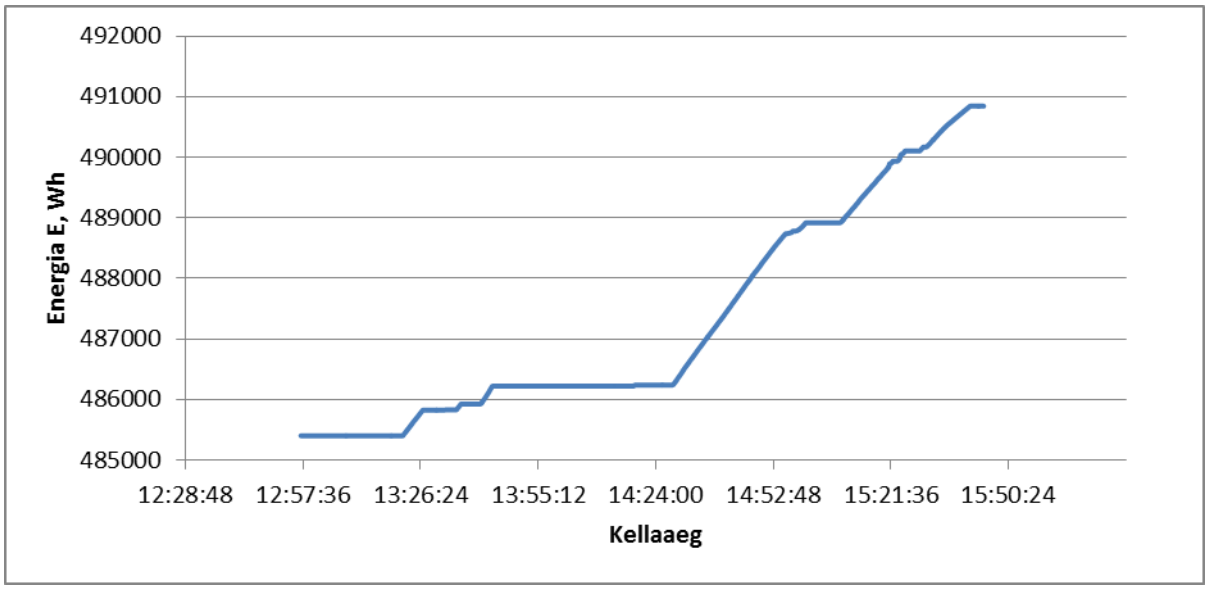
Briketid valati katlalabori etteandemahutisse ruumalaga 0,1512 m³ (0,6 m · 0,6 m · 0,42 m). Brikettide tihedus on järelikult 295,24 kg/m³.

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{44{,}64\ kg}{0{,}1512\ m^3} = 295{,}24\ kg/m^3, \quad (1.9.)$$

Toorme mõõtmed olid liiga suured briketeerimiseks ning suur osa brikette lagunes ära – sellest tingitud madalam mahumass.

Hakkpuidu briketeerimise protsessiks kulus 5439,2 Wh ehk umbes 5,44 kWh energiat (joonis 4.11). Ühe kilogrammi briketi tootmiseks kulus energiat 0,122 kWh/kg.

$$T_1 = \frac{E}{m} = \frac{5{,}44\ kWh}{44{,}64\ kg} = 0{,}122\ kWh/kg, \quad (1.10.)$$



Joonis 4.11. Tarbitud aktiivenergia kulu ajas

Joonisel 4.1. kujutatud protsess ei olnud ajas lineaarne.

4.6. Kaera, saepuru ja õlitaime segu briketeerimine

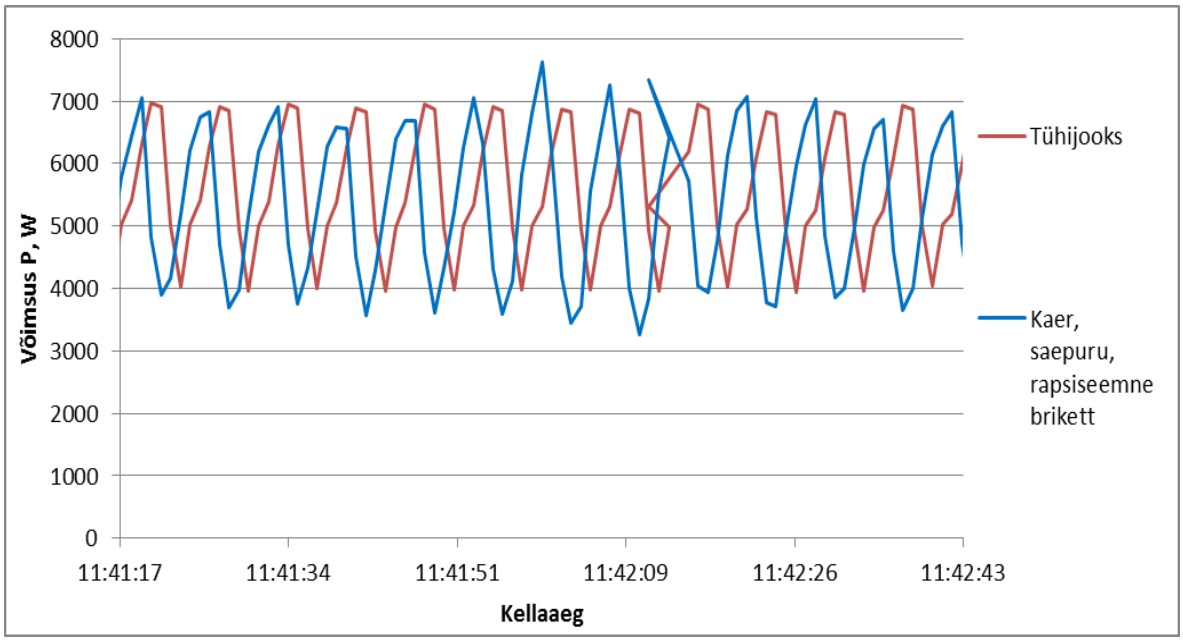
18. detsembril 2015. aastal prooviti toota Weima C-150 briketimasinaga 3 biomassi segust briketti. Katses kasutati kaera, saepuru ja rapsiseemneid, umbes vahekorras 1:1:1 (tabel 4.3).

Tabel 4.3. Toorme vahekord

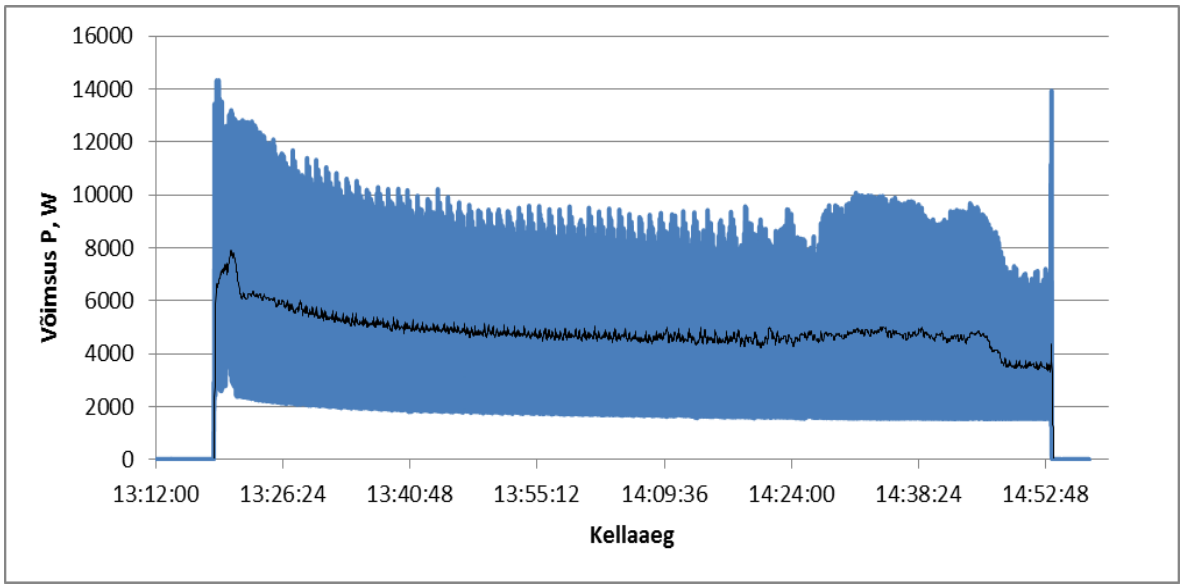
Materjal	**Mass, kg**	**Tihedus, kg/m³**
Saepuru	23,18	192
Kaer	23,98	600
Rapsiseemned	24,0	650
Kokku	71,16	

Tihedusi mõõdeti 20 liitrise pangega, kus pangetäie saepuru mass oli ligikaudu 4 kg, kaeral 12 kg ja rapsil 13 kg. Kogu katse aktiivvõimsuse keskmine oli 4827,43 W (joonis 4.13). Briketimasina kasuteguriks katsel saadi 9,8 %, see on 474,6 W täisvõimsusest (joonis 4.12).

$$\eta = \frac{P_{koormus} - P_{tühijooks}}{P_{koormus}} * 100\% = \frac{4827{,}43 - 4352{,}83}{4827{,}43} * 100\% = 9{,}8\ \%, \qquad (1.11.)$$



Joonis 4.12. Keskmistatud võimsused kaera, saepuru ja repsiseemnete segu briketi tootmisel ja tühijooksu olukorras



Joonis 4.13. Aktiivvõimsuse sõltuvus ajast

Briketeerimine kestis kokku 1 tund 35 minutit ja 15 sekundit, mille jooksul briketeeriti 71,16 kg. Tootlikkus katsel oli 44,83 kg/h.

$$\tau = \frac{t_1 \cdot m}{t_2} = \frac{3600\ s \cdot 71{,}16\ kg}{5715\ s} = 43{,}83\ kg/h, \qquad (1.12.)$$

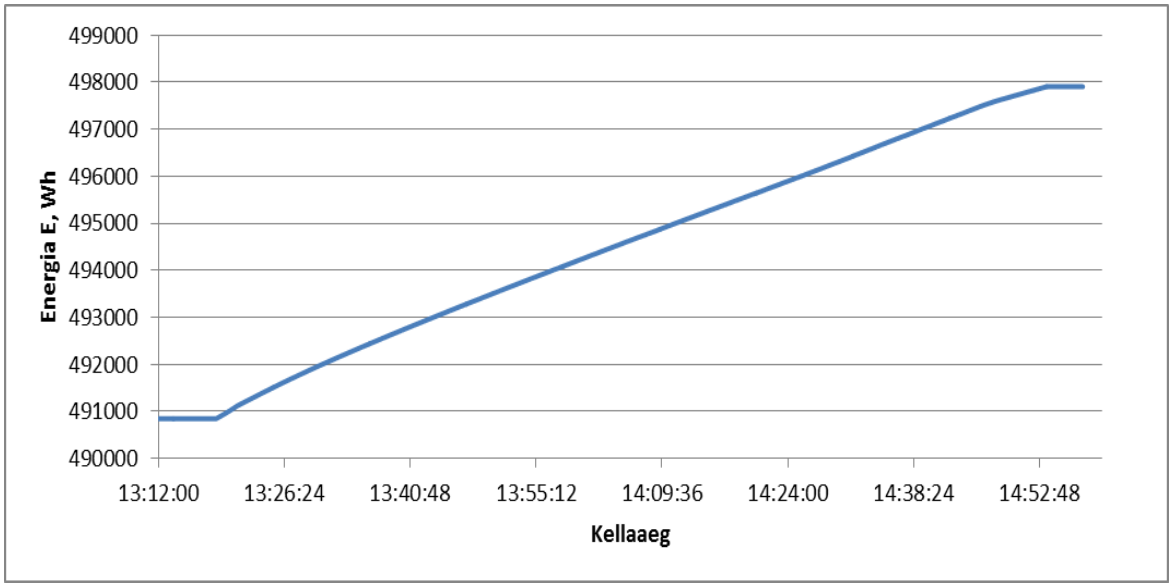
Briketid valati katlalabori etteandemahutisse ruumalaga 0,288 m³ (0,6 m · 0,6 m · 0,6 m). Kuna väljundmass (71,16 kg) on sama mis toormel, saavutati briketid tihedusega 247,1 kg/m³.

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{71{,}16\ kg}{0{,}288\ m^3} = 247{,}1\ kg/m^3, \qquad (1.13.)$$

Briketid olid võrreldes lehebrikettidega kergesti murenevad.

Tarbiti 7057,907 Wh ehk 7,058 kWh energiat, kilogrammi briketi tootmiseks kulus 0,0992 kWh/kg (joonis 4.14).

$$T = \frac{E}{m} = \frac{7{,}058\ kWh}{71{,}16\ kg} = 0{,}0992\ kWh/kg, \qquad (1.14.)$$



Joonis 4.14. Tarbitud aktiivenergia sõltuvus ajast

Briketeerimine kestis natuke üle poolteise tunni.

4.6. Järeldused

Kogutud andmed annavad ülevaate sooritatud briketeerimise katsete kohta (tabel 4.4). Kasutatud toormed erinesid nii mõõtmete, koguste kui ka tiheduste poolest. Kõige kõrgema tihedusega briketid saadi lehtedest: 564 kg/m³. Lehtede briketeerimisel saadi kolmest katsest kõige väiksem tootlikkus. Kuna lehtede enda puistetihedus võrreldes hakkpuiduga või briketeeritud seguga on tunduvalt madalam, siis tigusööturile liikuv etteanne oli vähem mahukam. Hakkpuidu ja briketeeritud segu briketid oli väga väikse tihedusega. Kuuse hakkpuidu mõõtmed olid ebasobivad briketeerimaks. Ka katse jooksul kiilus masin palju kordi kinni ning oli vaja tigusööturit puhastada või siis aidata kaasa sellele. Briketid ei jäänud peale pressimist väga tihedalt kokku, esines palju pragusid ning õhuavasid (lisa 6).

Kaera, saepuru ja rapsiseemnete väike tihedus 247,1 kg/m³ tuleneb ebasobivast vahekorrast. Katses kasutati kaera, saepuru ja rapsiseemneid vahekorras 1:1:1 ehk igat tooret lisati 24 kilogrammi. M. Hovi ja K. Hovi briketeerisid 2014. aastal kaera ja saepuru briketti (tabel 4.5), kus 25% oli kaera ja 75% saepuru ning saavutati brikett tihedusega ligikaudu 975 kg/m³.

Brikettide tihedusi mõõdeti 20-liitrise pangega. Kuna pange asetatud briketid ei täitnud kogu pange ruumi täielikult ära ehk brikettide vahele jäid tühjad kohad, siis sellest tulenevalt on brikettide tegelik tihedus saavutatud tihedustest mõnevõrra suurem.

Kõigil kolmel katsel saavutati võimsuseks ligikaudu 4,8 kW. Tööst saab järeldada, et briketeeritavast toormest oleneb, kui palju kulub energiat ühe kilogrammi briketi tootmiseks. Tootlikkuse ja tarbitud energia kilogrammi vahel esineb seos – mida kõrgem tootlikkus, seda vähem energiat kulub kilogrammi briketi tootmiseks.

Kasuteguri leidmiseks kasutati kaudset meetodit. Kaera, saepuru ja rapsiseemnete briketeerimisel saadi kõige kõrgem briketimasina kasutegur 9,8%. Hakkpuidust briketi tegemisel on tegelikult masina kasutegur veelgi väiksem, kui kaasa arvata masinaga esinenud probleemid. Lehebriketi tootmisel oli masina kasutegur ligemale 9%. Kolme katse keskmine kasutegur on 8,95%.

Tabel 4.4. Töö autori katsete tulemused

Briketid	Mass, kg	Aeg, h (tundi: minutit: sekundit)	Tihedus ρ, kg/m³	Tootlikkus τ, kg/h	Võimsus P, kW	Energia E, kWh	Energia kilogrammi kohta E_1, kWh/kg	Masina kasutegur η, %
Lehebrikett	32,5	1,13 (01:07:56)	564,0	28,7	4,778	4,94	0,152	8,90
Hakkpuit (kuusk)	44,64	1,02 (01:01:12)	295,24	43,8	4,74	5,44	0,122	8,14
Kaera, saepuru ja rapsimeene segu	71,16	1,58 (01:35:15)	247,1	43,83	4,83	7,06	0,099	9,80
Tühijooks	-	0,11 (00:06:23)	-	-	4,35	0,58	-	-

Antud töös tehtud katsete tulemusi on võimalik autoril võrrelda Mart Hovi ja Külli Hovi poolt 2014. aastal Eesti Maaülikooli Tehnikainstituudis toimunud põllumajanduslike brikettide proovipartiide tootmise tulemustega. [36]

Tabel 4.5. Briketeerimisel kogutud andmed energiakulu ja tootlikkuse kohta [36]

Briketid	vahekord	Aeg, h	E, kWh	Mass, kg	ρ, kg/m³	E_1, kWh/kg	τ, kg/h	P, kW
Kaer	1+3	0,4	1,829	24,94	976,28	0,073336	62,26	4,57
Oder	1+3	0,6	2,709	33,92	1031,3	0,079864	56,53	4,52
Kaer	1+4	0,52	2,055	30,7	920,81	0,115976	59,01	3,95
Hake	1	0,64	3,078	26,54	965,4	0,115976	41,43	4,81
Koor	1	0,47	1,983	22,12	1059,3	0,089647	47,04	4,22
Tühijooks								3,55

Töö autori poolt teostatud töös oli tühijooksu võimsus 4,35 kW, kuid 2014. aastal mõõtmised näitasid, et see oli 3,55 kW (tabel 4.5). Briketeerimise võimsused jäid mõlema uuringu ja kõikide katsete põhjal samasse suurusjärku. Mõningad erinevused esinesid veel

ühe kilogrammi briketi tootmiseks kuluva energia osas. M. Hovi ja K. Hovi poolt teostatud katsetel oli teraviljadel energia kilogrammi kohta vahemikus 0,063 – 0,078 ja puukoorel 0,09 kWh/kg. Töö autoril saavutati saepuru, kaera ja rapsiseemnete korral väärtus 0,01 kWh/kg, mis võib olla tingitud toorme teistsugusest vahekorrast. Antud töö tootlikkused olid samuti võrdlemisi väiksemad. Hakkpuidu briketeerimisel saavutati mõlemas uuringus väga sarnased tulemused.

Brikettide tihedused erinevad väga palju. Töö autor leiab, et tiheduste mõõtmisel kasutati tööde puhul erinevaid mõõtmismetoodikaid. Antud töö puhul on tegelikud brikettide tihedused mõnevõrra suuremad. Brikettide tihedust vähendavad ka ebasobivad lähtematerjalide vahekorrad või mõõtmed.

Võib järeldada, et toorme vahekorrast ja briketeeritavast kogusest olenevad töös esitatud parameetrid. Mida rohkem tooret on etteande mahutis, seda suurema jõuga liigub see tigusööturile peale. Ei teki olukorda, kus tigusöötur oleks pooleldi tühi.

KOKKUVÕTE

Käesolevas bakalaureusetöös antakse ülevaade briketeerimisest, toorainetest, erinevatest briketimasinatest. Töö praktilises osas mõõdeti võrguanalüsaatoriga hüdraulilise briketimasina Weima C-150 tööparameetreid. Briketeeriti puulehti, hakkpuitu ja ühel korral erinevat tüüpi biomassi segu. Uuringu käigus tehti katsed, kus võrreldi tühijooksu ja briketeerimise olukordi.

Briketeeritavad lähtematerjalid olid omadustelt väga erinevad. Hakkpuidu ja biomassi segust toodetud briketid olid väikse tihedusega. Hakkpuidu briketeerimiseks kasutatav toore oli mõõtmetelt liiga suur vastava briketimasina jaoks, briketil esines palju pragusid. Biomassi segu briketeerimisel kasutati saepuru, kaera ja rapsiseemneid ning nende kogused olid võrdsed. Moodustunud brikett murenes kergesti. Töö autor järeldab, et lähteainete vahekord ei olnud sobiv, sest biomassis olenev ligniin ei sidunud briketti piisavalt hästi kokku. Lehebriketi tihedus oli eelmistest ligikaudu kaks korda suurem.

Võimsused brikettide tootmisel olid samas suurusjärgus ning erinevused olid minimaalsed. Mõõtetulemustest järeldus, et mida kõrgem tootlikkus, seda vähem energiat kulub kilogrammi briketi tootmiseks. Ühe kilogrammi briketi tootmiseks kulus kõige rohkem energiat lehebrikettidel. Briketeeritavad lehed oli väga kuivad ja kerged ning toore ei täitnud alati etteandetigu täielikult. Hakkpuidu ja biomassi segu tootlikkused olid sarnased, kuid kilogrammi tootmiseks kulunud energia vahel esines väike erinevus. Hakkpuidu briketeerimisel esines masinal palju kinni kiilumisi ning tingitud ülekoormuse tõttu võis kuluda rohkem energiat.

Hüdraulilise briketimasina parameetreid mõõdeti ka tühijooksu olukorras. Kaudsel meetodil oli võimalik arvutada masina kasutegur. Madalaim kasutegur saadi hakkpuitu briketeerides ja kõrgeim biomassi segul. Kolme katse keskmine kasutegur oli ligikaudu 9%, mis on väga madal. Töö autor leiab, et briketimasina tööd tuleks täiendavalt uurida ning leida võimalus vähendamaks suurt hõõrdumist.

ENERGY BALANCE OF THE BRIQUETTING MACHINE

SUMMARY

Thesis provides an overview of briquetting process and Weima C-150 briquette press operations based on tests conducted by the author. The aim of the thesis is to analyze the operation of the briquette press under idling speed and in operating state.

Thesis subject was selected both due to interest in briquette machinery and its topical nature. Briquetting allows for economical utilization of biomass waste resulting from treatment of agricultural crops: after drying, processing and timber materials with burning properties can be used as briquette materials. The relevant indicators for briquettes are density, burning behavior, space-saving on storage. Briquette quality depends on the briquette machinery. Briquetting process is considered to be relatively energy intensive, but the main cost comes from the movement of the working mechanism.

The work consists of both theoretical and practical sections. The theoretical section provides an overview of renewable energy, nature of briquetting, the starting materials for biofuel and compression technology.

Practical section uses hydraulic briquette press Weima C-150, power quality analyzer Janitza UMG 605 and scales KERN 440-33N, TSCALE, which belong to the Estonian University of Life Sciences' Institute of Technology. Data was processed, using GridVis Basic software, which was used to import data into Excel format. The work measured following indicators: current, voltage, power factor and apparent, real and reactive powers.

Thesis provides an overview of briquetting process, raw materials and various types of briquetting machinery. The practical section of the work used a power quality analyzer to measure the performance of hydraulic briquette press Weima C-150. Raw materials included leaves, wood chips and in one case a mixture of different biomasses. The study included experiments where no-load operations were compared to briquetting operations.

Source materials for briquetting had very different characteristics. Briquettes produced from wood chips and biomass mixture had a low density. The raw materials used for briquetting wood chips were too large for that particular type of briquette press, which

resulted in cracked briquettes. Briquetted biomass mixture included saw dust, oats and rapeseed in equal quantities. Resulting briquettes crumbled easily. The author concludes that the ratio of source materials was not suitable, because the lignin in biomass did not bond the briquettes well enough. Leaf briquette density values were nearly twice as high as for previous materials.

The capacities used for briquette production were of the same order of magnitude and the differences were minimal. Measurement results revealed that the higher the productivity, the less energy is required for the production of briquettes per kilogram. Leaves had the highest energy cost per production of one kilogram of briquettes. The leaves were very dry and light and the raw materials did not always fill the feed device completely. The yields for wood chips and biomass mixture were similar, but they showed a slight difference in energy cost per production of one kilogram of briquettes. Wood chip briquetting caused many jams in the press and such overloading may have resulted in higher energy cost.

The performance of the hydraulic briquette press were also measured in its unloaded state. The use of an indirect method allowed the calculation of the efficiency ratio of the machine. The wood chip briquetting process had the lowest efficiency ratio and the biomass briquetting had highest efficiency. The average efficiency ratio for three tests was approximately 9%, which is very low. The author believes that the briquette press operations require further study and a solution for high friction issue.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. BP Statistical overview of World Energy June 2015. (2015). Edinburgh: Centre for Energy Economics Research and Policy, Heriot-Watt University. https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-full-report.pdf (21.05.2016) (http://euanmearns.com/global-energy-trends-bp-statistical-review-2015/)
2. Müller, A., Weigelt, J., Götz, A., Schmidt, O. The Role of Biomass in the Sustainable Development Goals: A Reality Check and Governance Implications. (2015). Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS). http://globalsoilweek.org/wp-content/uploads/2015/04/Working_Paper_150416_TB_digital.pdf (21.05.2016) LK 3
3. Nartey, A.I. (2014). Design, construction and testing of a briqueting machine (Bakalaureusetöö). Kwame Nkrumah University of Scenice and Technology. Kwame. https://www.idin.org/sites/default/files/resources/KNUST%20Briquette%20Machine%20Spring%202014.pdf (21.05.2016)
4. Sustainable development goals 2030. United Nations https://sustainabledevelopment.un.org/?menu=1300 (21.05.2016)
5. The path to a more sustainable energy future.(2013). Shell Global http://www.shell.com/media/speeches-and-articles/2013/the-path-to-a-more-sustainable-energy-future.html (21.05.2016)
6. Tehnoloogilise oskustarbe ja biomassiga varustamine oskusteabe edendamine Kesk- ja Ida-Euroopas. (2008). EL 6. RP projekti COFITECK kokkuvõte. http://www.seit.ee/failid/499.pdf (21.05.2016)
7. Eesti statistika aastaraamat 2015. (2015). /Toim. K. Põder., H. Loode. Tallinn: Statistikaamet.. http://energiatalgud.ee/img_auth.php/e/e2/Eesti_Statistika._Eesti_statistika_aastaraamat_2015._2015.pdf (21.05.2016)
8. Taastuvenergia Eestis. (2014). Eurostat. Eesti Taastuvenergia Koda. http://www.taastuvenergeetika.ee/eesti-statistika/ (21.05.2016)
9. Biomassi kasutamine energeetikas. Eesti Elektritööstuse Liit. (http://www.elektriliit.ee/biomass-kasutamine-energeetikas) (22.05.2016)
10. Laur, M. (2007). Põhugraanulite tootmistehnoloogia. /Toim. I. Leuhin., D. Teperik. Noorteadlased taastuvenergiast. Tartu: K-Tolliblanketid OÜ, lk 82-90. https://www.etis.ee/File/DownloadPublic/2be422f4-7faa-4ceb-992d-1aaf527d97ba?name=Fail_EMY_TEK_kogumik_final2.pdf&type=application%2Fpdf (22.05.2016)

11. Mida on vaja teada puitpelletitest. Puumarket. http://www.puumarket.ee/?op=body&id=3&art=1077 (22.05.2016)
12. Puit. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli soojustehnika instituut. https://www.ttu.ee/public/m/Mehaanikateaduskond/Instituudid/soojustehnika-instituut/oppematerjalid/kyte-ventilatsioon/2._Puit.pdf (22.05.2016)
13. Puitbrikett ja pelletid. Briketipoisid OÜ. Tallinn. http://www.briketipoisid.ee/puitbrikett-ja-pelletid/ (22.05.2016)
14. Mihkels, I. (30. Jaanuar 2015). Puitbrikett annab ahjukütjale hõlpu. http://www.ohtuleht.ee/660410/puitbrikett-annab-ahjukutjale-holpu (22.05.2016)
15. Mis on pellet?. (2016). Pelletipood kodusooja maaletooja. http://pelletipood.eu/mis-on-graanul/ (22.05.2016)
16. Puusüsi. (2016). Estland Energy Trade. http://www.estland-energy.eu/est/charcoal.php (22.05.2016)
17. Puit. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli soojustehnika instituut. https://www.ttu.ee/public/m/Mehaanikateaduskond/Instituudid/soojustehnika-instituut/oppematerjalid/kyte-ventilatsioon/2._Puit.pdf (22.05.2016)
18. Alkoholi-, tubaka-, kütuse- ja elektriaktsiisi seadus. § 19. Kütus ja elektrienergia. (Jõustunud 01.01.2008). – Riigi Teataja https://www.riigiteataja.ee/akt/ATKEAS (22.05.2016)
19. TEUK X Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine. (2008). /Toim. E. Vollmer., A. Normak. Tartu: Eesti Maaülikool. 27 lk. http://tek.emu.ee/userfiles/taastuvenergia_keskus/TEUK%20kogumikud/TEUKX_kogumik.pdf (22.05.2016)
20. Hovi, M. (1995). Mitmeaastased rohttaimed energeetilise toormena Eesti Vabariigis. (Magistritöö). Eesti Põllumajanduseülikooli põllumajandusenergeetika instituut. Tartu.
21. Alvela, A. (4. detsember 2014). Turbabrikett kaob ahjudest. http://maaleht.delfi.ee/news/maaleht/tarbija/turbabrikett-kaob-ahjudest?id=70289287 (22.05.2016)
22. Pukk, S. Turba erinevad kaevandamistehnoloogiad. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli maaehitusinstituut. http://www.ene.ttu.ee/Maeinstituut/talveakadeemia/TA2007/Kaevandamistehnoloogiad.pdf (22.05.2016)
23. BELFUEL. Peat Extraction Technology. http://www.belfuel.eu/peat-extraction-technology/ (22.05.2016)
24. RUF. (2016). Brikett. http://www.ruf-brikett.de/quality.php (22.05.2016)
25. Prislan, P., Krajnc, N., Jemec, T. (2014). Monitoring of wood fuel prices in Slovenia, Austria, Italy, Croatia, Romania, Germany, Spain and Ireland. Wood fuel prices – Report

no. 6 http://www.biomasstradecentre2.eu/scripts/download.php?file=/data/upload/Wood_fuel_prices_in_2014_I_report_no_6_final.pdf (22.05.2016)

26. Energypedia. (2014). Biomass Briquettes – Production and Marketing. https://energypedia.info/wiki/Biomass_Briquettes_%E2%80%93_Production_and_Marketing#Markets_and_Users_for_Briquettes (22.05.2016)
27. Puitbrikett ja pelletid on eeskujuliku kuluefektiivsusega. Briketipoisid OÜ Tallinn. (http://www.briketipoisid.ee/kutteviiside-vordlus/ (22.05.2016)
28. Energypedia. (2014). Biomass Briquettes – Production and Marketing. (https://energypedia.info/wiki/Biomass_Briquettes_%E2%80%93_Production_and_Marketing#Markets_and_Users_for_Briquettes)
29. Davies, M.C. (1985). USA: Volunteers in Tecnical Assistance (VITA). http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNABC956.pdf (22.05.2016)
30. Puidu keemiline koostis. (2009). Pärnu: Tallnerk Grupp http://www.tallnerk.ee/?224 (22.05.2016)
31. Energypedia. (2014). Briquetting Technologies. https://energypedia.info/wiki/Biomass_Briquettes_-_Production#Briquetting_Technologies (22.05.2016)
32. Hüdroajam. (2010). Tartu: Tartu Kutsehariduskeskus. http://e-ope.khk.ee/ek/2010/puidu_masintootlemise_tehnoloogia/Sissejuhatus_masint/hdroajam.html (22.05.2016)
33. Weima Briquetting presses C-series kataloog. /Toim. Weima Maschinenbau GmbH. http://weima.com/assets/pdf/prospekte/brikettieren/2012%20C150-170%20english%20web.pdf (22.05.2016)
34. Janitza rakendusjuhis AN1014/V01 EST. (2014). /Koost. Energiatehnika OÜ. Tallinn: Energiatehnika OÜ. http://www.energiatehnika.ee/WWW_files/files/user_files/infokiri/Janitza_rakendusjuhend.pdf (22.05.2016)
35. SPS. (2016). Computer Hope. http://www.computerhope.com/jargon/s/sps.htm (22.05.2016)
36. M, Hovi., K, Hovi. (2014). Lisanditega puitbriketi energiabilanss. http://www3.emu.ee/mhovi/ECOHOUSING/TEUK2014/Briketiposter.pdf (25.05.2016)

LISAD

Lisa 1. Eestis toodetavad briketid

Tootja	Toode	Müügil olev kogus ja hind, kg/€	Tonni hind eurodes, t/€	Küttevääртus, MWh/t	Tuhasus, %	Niiskus, %
Briketipoisid						
	Ümar Extra	970kg/160 eur	164,95	5,05	0,5%	8%
	Hele Standard (ristkülik)	960kg/160 eur	166,67	4,95	0,6%	7,5%
	Tume Premium (ristkülik)	960kg/170 eur	177,08	5	0,5%	8%
	Premium Pellet 8mm	975kg/200 eur	205,13	5	0,5%	8%
Tallinna kütteladu						
	Ümar puitbrikett TUME 9kg tk	970 kg/149 eur	153,61	-	-	-
	Kandiline puitbrikett okaspuu	960kg/145 eur	151,04	5	-	-
	Kandiline puitbrikett TUME termopuit	960kg/170 eur	177,08	5	-	-
	Kandiline puitbrikett KASK	960kg/152 eur	158,33	5	-	-
	Premium Pellet	975kg/ 200 eur	205,13	4,9	0,5	10
	Sangla turbabrikett	950kg/ 119 eur	125,26	4,5 - 4,6	-	-
	Põhubrikett	1000kg/139 eur	139	-	-	-
	Kivisüsi	1000kg/200 eur	200	8,9		
Leili brikett OÜ						
	PELLET 8 mm Premium Pluss	960kg/ 185 eur	192,71	5,3	0,3-0,5	-
	PELLET 6 mm Premium Pluss	960kg/185 eur	192,71	5,3	0,3-0,5	-

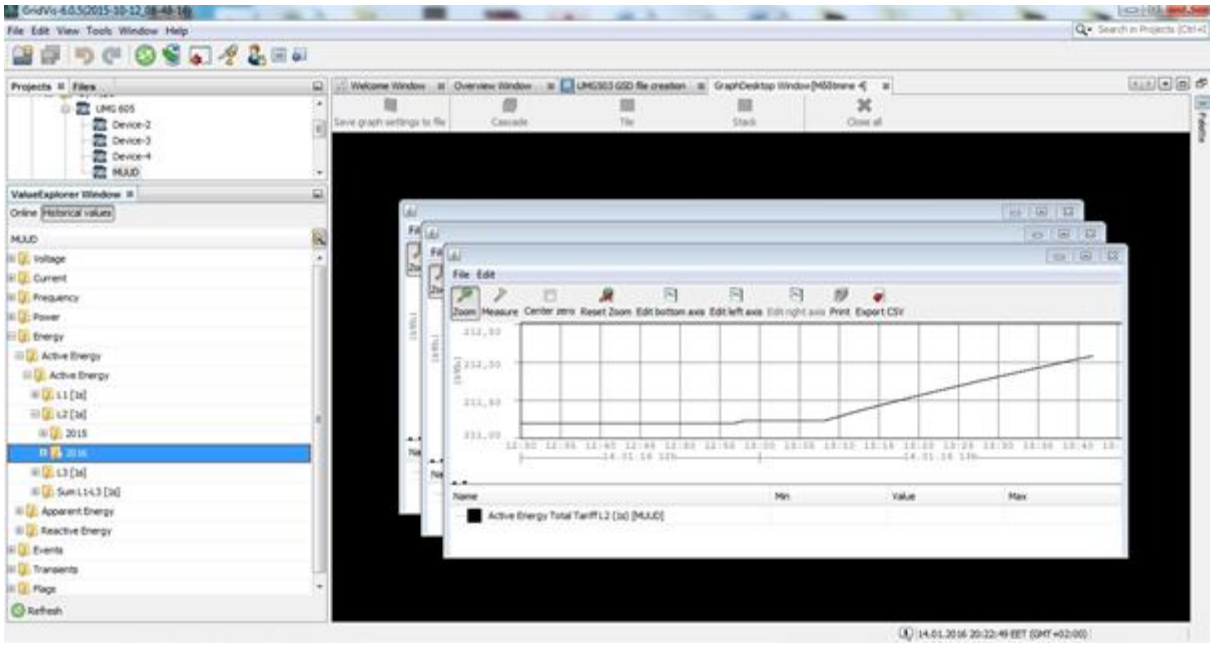
Lisa 2. 150 m² elamu kütmisega seotud kulutused aastas [27]

Kütteliik	**Kogus (aastas)**	**Ühik**	**Hind eurodes**	**Hind kuus**	**Hind aastas**
Puitbrikett	5,5	tonn, t	160	73,33	880,00
Küttepuu (kuiv)	16,8	kuupmeeter, m³	61	85,40	1024,80
Pellet	5,5	tonn, t	210	92,75	1113,00
Gaas	3300	kuupmeeter, m³	0,49	134,75	1617,00
Elektriküte	25500	kilovatt-tund, kWh	0,0954	202,73	2432,00
Kütteõli	2,6	tonn, t	990	214,50	2574,00

Lisa 3. Weima C-150 briketimasin

Lisa 4. Ühendatud võrguanalüsaator ja mõõtetrafod

Lisa 5. Näide programmist GridVis tööolukorras



Lisa 6. Lehebrikett, hakkpuidubrikett ja kaera, saepuru, rapsiseemne brikett

Lisa 7. Brikettide kogumine plastikust punutud kottidesse

Lisa 8. Kuivavad lehed tehnikamaja 5. korrusel

Lisa.9. Lehed 100 liitristes prügikottides

Lisa 10. Briketeeritavad lehed

Lisa 11. Lähtematerjali ja brikettide koguste võrdlus

Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja/või üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Kristjan Rosenberg

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö Kütusebriketimasina energiabilanss,

mille juhendajad on Mart Hovi ja Külli Hovi,

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____

(allkiri)

Tartu, 25.05.2016

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

_____ _____

(juhendaja nimi ja allkiri) (allkiri)

_____ _____

(juhendaja nimi ja allkiri) (allkiri)