

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU

Uusiutuvan energian koulutus

Ylempi ammattikorkeakoulututkinto

Vesa-Matti Ruismäki

PUUKAASUN TUOTANTO LAPIN KOULUTUSKESKUS REDUSSA

Opinnäytetyö

Toukokuu 2021



**OPINNÄYTETYÖ**  
**Maaliskuu 2021**  
**Uusiutuvan energian koulutus**  
**Ylempi ammattikorkeakoulututkinto**

Tikkarinne 9  
80200 JOENSUU  
+358 13 260 600 (vaihde)

Tekijä(t)  
Vesa-Matti Ruismäki

Nimeke  
Puukaasun tuotanto Lapin koulutuskeskus REDUssa

Toimeksiantaja  
Lapin koulutuskeskus REDU

Tiivistelmä

Opinnäytetyön tavoitteena oli puukaasun tuotannon ja -käytön esisuunnittelu, tuotantolaitoksen mitoitus ja kannattavuustarkastelu. Tässä puukaasun tuotantolaitoksessa tuotettu puukaasu poltetaan lämpöenergiaksi, joka käytetään Lapin koulutuskeskus REDUn Jänkätien toimintayksikössä.

Opinnäytetyössä käytettävien tietojen keräämiseen haastateltiin useita eri asiantuntijatahoja niin oman organisaation sisältä kuin ulkopuolisia asiantuntijoitakin. Opinnäytetyön aineistona käytettiin ammattikirjallisuutta, uusimpia tutkimustuloksia ja omaa osaamista. Mitoituksessa lähtötietoina käytettiin Jänkätien toimintayksikön todellisia kulutusarvoja. Kannattavuuslaskelman investointikustannukset tuotantolaitoksen teknisiin sovellutuksiin pyydettiin budjettitarjouksin eri laitetoimittajilta.

Opinnäytetyön tuloksena on se, että uuden puukaasun tuotantolaitoksen investointi on taloudellisesti kannattavaa. Taloudelliseen kannattavuuteen vaikuttavat merkittävimmin tekijöinä polttoaineen hinta, tuotetusta lämmöstä saatava säästö sekä oppimisympäristön tuoma lisäarvo. Investoitava puukaasuntuotantolaitos toimii uutena oppimisympäristönä energia-alan koulutuksissa. Opinnäytetyössä tehtyä kannattavuuslaskelmaa käytetään pohjatietona uuden tuotantolaitoksen investoinnissa. Lisäksi tässä opinnäytetyössä pohditaan muuta mahdollista käyttöä tuotetulle puukaasulle.

Kieli  
suomi

Sivuja 65  
Liitteet 0  
Liitesivumäärä 0

Asiasanat  
Puukaasu, kaasutus, energia, energiantuotanto, mitoitus



**THESIS**  
**March 2021**  
**Degree Programme in Renewable Energy**  
**Masters Degree Programme**

Tikkarinne 9  
80200 JOENSUU  
FINLAND  
+ 358 13 260 600 (switchboard)

Author (s)  
Vesa-Matti Ruismäki

Title  
Production of Wood Gas in Lapland Educational Centre REDU

Commissioned by  
Lapland Education Centre REDU

Abstract

This thesis pre-designs the production and usage of wood gas at Lapland Education Centre REDU.. The wood gas production facility is used as a new learning environment for education at different branches of the education centre. The produced wood gas is burned for thermal energy which is used at Jänkätie unit of Lapland Education Centre REDU.

Gathering information was done by interviewing many experts from Lapland Education Centre Redu, as well as outside organizations. Real consumption values are used for scaling. Budget offers for technical appliances have been requested from different manufacturers.

The results of this thesis indicate that an investing in a new wood gas production facility is economically profitable. The most remarkable factors for profitability are the cost of fuel, savings from produced heat and extra value provided by the new learning environment. Wood gas production facility that is to be invested serves as a new learning environment for educations of energy sector. The wood gas production facility scaling and profitability calculation are made as a foundation for investing wood gas production facility. In addition, there are thought other possibilities of usage for produced wood gas.

The results of this thesis can be used in CO<sub>2</sub>REDUction project where construction of new multibranch learning environment is examined. In this learning environment there would also be concentration for education and research of different ways to produce renewable energy.

Language  
Finnish

Pages	65
Appendices	0
Pages of Appendices	0

Keywords  
wood gas, gasification, energy, energy production, scaling

# Sisältö

1. Johdanto .....	5
2. Puukaasun tuotanto .....	6
2.1 Puun ominaisuudet .....	6
2.2 Puun energiasisältö .....	9
2.3 Kalorimetrinen lämpöarvo eli ylempi lämpöarvo HHV .....	11
2.4 Tehollinen eli alempi lämpöarvo LHV .....	12
3. Palaminen .....	14
3.1 Palamisen perusteet .....	14
3.2 Puukaasun ominaisuudet .....	16
3.3 Pyrolyysi eli kuivatislaus .....	17
3.4 Kaasutusreaktiot .....	20
3.5 Kaasutus prosessi .....	22
4. Kaasutintyypit .....	23
4.1 Kiinteäkerroskaasuttimet .....	23
4.2 Myötävirtakaasutin .....	23
4.3 Vastavirtakaasutin .....	25
4.4 Leijutuskaasutin .....	26
5. Tuotekaasun käyttö .....	29
6. Turvallisuus .....	33
6.1 Tuotantolaitoksen yleinen turvallisuus .....	33
6.2 Turvallisuusjärjestelmät .....	35
6.3 Varolaitteet .....	38
6.4 Varajärjestelmät .....	39
6.5 Lainsäädäntö .....	39
7. Kannattavuuslaskenta .....	41
7.1 Nykyarvomenetelmä .....	41
7.2 Takaisinmaksumenetelmä .....	42
7.3 Annuiteettimenetelmä .....	42
7.4 Likimääräinen annuiteettimenetelmä .....	43
8. Tuotantolaitoksen mitoitus .....	43
8.1 Työn tavoitteet ja menetelmät .....	43
8.2 Oppimisympäristön käyttö .....	45
8.3 Mitoitus .....	46
8.4 Mitoituksen lähtötiedot .....	47
8.5 Mitoitus .....	50
8.6 Investoinnin kannattavuus .....	55
8.7 Herkkyysanalyysi .....	57
9. Pohdinta .....	61
10. Lähteet .....	64

## 1. Johdanto

Opinnäytetyön aiheen perustana on ”Puusta liikenteen polttoaineeksi - esiselvitys” -hanke, jossa tutkittiin puukaasun tuotantoa ja käyttöä liikenteen polttoaineena. Hankkeen aikana selvitettiin erityisesti mahdollisuuksista korvata tuontiöljyä kotimaisella liikenteen polttoaineella ja täten estää alueellinen pääomapako ja hillitä ilmastonmuutosta.

Lapin koulutuskeskus REDUlla on pitkät perinteet kaukolämpölaitoksen hoitajien kouluttajana. Jänkätien toimintayksikössä on käytössä teholtaan 2,2 MW oleva kaukolämmön tuotantolaitos, joka on kytketty Rovaniemen kaukolämpöverkkoon. Tämä tuotantolaitos toimii ensisijaisesti oppimisympäristönä. Tässä opinnäytetyössä selvitetään puukaasun tuotannon mahdollisuudet ja mahdolliset kustannussäästöt Lapin koulutuskeskus REDUssa uutena oppimisympäristönä. Puukaasun tuotantoa ja kannattavuutta tutkitaan lämmöntuotannon osalta. Tämä lämpö tuotetaan polttamalla puun kaasutusprosessista saatavalla lämpöenergialla.

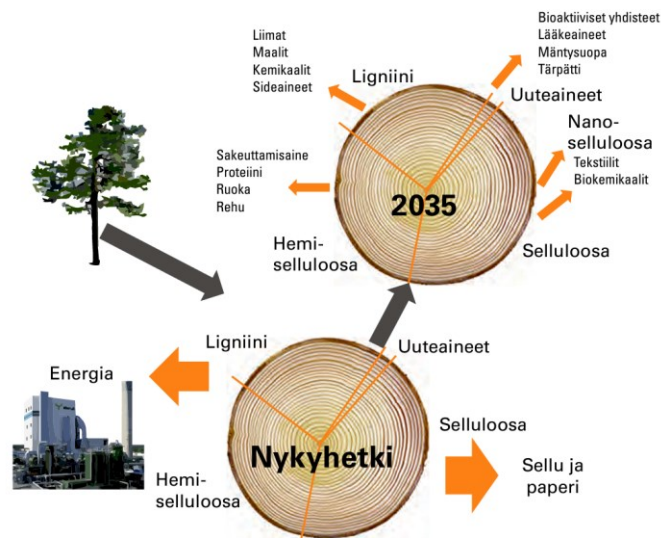
Opinnäytetyössä lasketaan lisäksi puukaasun tuotantolaitoksen investoinnin kannattavuus. Tämä kannattavuuslaskelma toteutetaan nykyarvomenetelmällä. Lisäksi tässä opinnäytetyössä pohditaan puukaasun jalostamista sekä tästä syntyvän korkeamman jalostusasteen omaavan kaasun käyttömahdollisuuksia sekä jalostamisen vaikutuksia investointiin ja investoinnin kannattavuuteen.

## 2. Puukaasun tuotanto

### 2.1 Puun ominaisuudet

Puun sisältämät tärkeimmät rakenneaineet ovat ligniini, selluloosa ja hemiselluloosat. Ligniini toimii sidosaineena, joka sitoo puun rakenneaineet toisiinsa sekä muodostaa puulle mekaanisen lujuuden. Ligniini sisältää paljon lämpöä tuottavia aineita kuten hiiltä ja vetyä. Selluloosa on pitkänomaista kuitua, jota on puun soluseinämässä. Selluloosan vaikutuksesta puu saa elastisia ominaisuuksia lyhytaikaiseen kuormitukseen. Puun kuivuessa soluseinämien välissä oleva vesi poistuu ja puu kutistuu soluseinämien painautuessa lähemmäksi toisiaan. Hemiselluloosa on hiilihydraattiryhmä, jossa on erilaisia sokerin muodostamia melko lyhyitä ketjuja. (Saranpää 2018, 418–419.)

Puu sisältää myös erilaisia uuteaineita. Uuteaineet koostuvat erilaisista yhdisteistä. Näitä yhdisteitä ovat esimerkiksi rasvat ja fenolit. Uuteaineiden osuus kuiva-aineesta on pieni, noin 1 - 5 % kuiva-aineesta. Uuteaineiden osuus riippuu puulajista. Uuteaineista muodostuu sellun keiton yhteydessä mäntyöljyä sekä tärpähtiä. Mäntyöljyä voidaan jalostaa ja siitä voidaan tuottaa erilaisia biopolttoaineita. Kuvassa 1 näkyy puun käyttökohteita nyt ja tulevaisuudessa. (Saranpää 2018, 418–419.)



Kuva 1. Puun käyttökohteita nyt ja tulevaisuudessa (Saranpää 2018, s. 442)

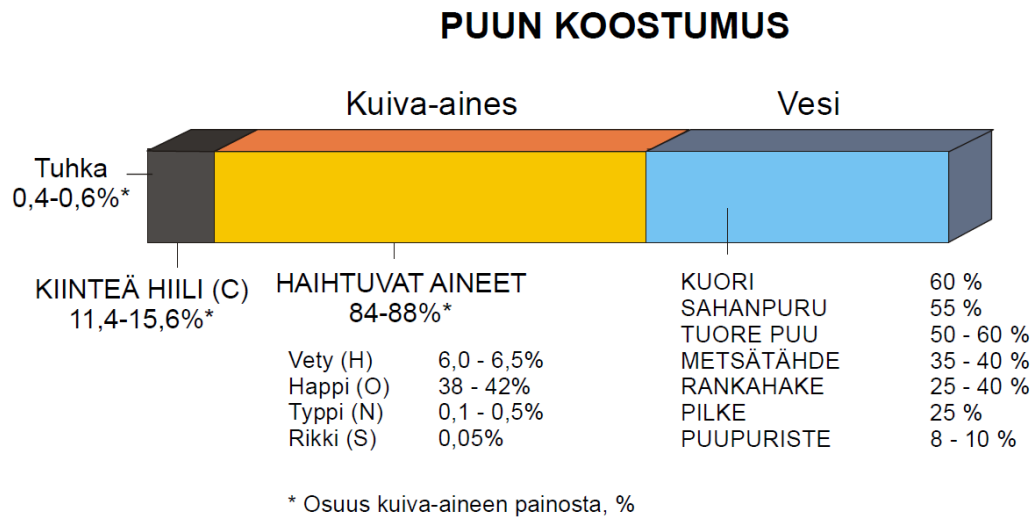
Puun koostumus voidaan jakaa polttoteknisesti kahteen pääosaan: kuiva-aineeseen sekä puun sisältämään veteen. Kuiva-aine voidaan karkeasti jakaa kuvan 2 mukaan kolmeen osaan:

- Kiinteä hiili, 11,4 – 15,6 % kuiva-aineesta
- Haihtuvat aineet, 84 – 88 % kuiva-aineesta
- Tuhka 0,4 – 0,6 % kuiva-aineesta.

Puusta lähes 90 % on haihtuvia aineita. Tämän vuoksi puu on niin sanotusti pitkäliekkinen polttoaine ja se vaatii suuren palotilan. Biomassa ja täten kuiva-aines jakaantuu puussa moneen eri osaan, runko, oksat, lehdet/neulaset ja kuori. Näiden eri osien määrä vaihtelee huomattavasti eri puulajien mukaan. Vaikka puun biomassa jakaantuu eri lailla eri puulajeilla, niiden alkuaineiden osuus on suhteellisen sama. (Alakangas 2000, 35–36.)

Kuten kuvasta 2 voidaan todeta, puussa olevan tuhkan määrä on pieni. Tyypillisesti kuorettoman runkopuun tuhkapitoisuus on alle 0,5 % kokonaismassasta. Puun kuoren tuhkapitoisuus on kuitenkin suurempi, koivun 1,6 %:sta kuusen 2,8 %:iin. Energian tuotannossa käytettävissä laitteissa käytettävässä polttoaineessa on mukana myös kuorta, joka nostaa tuhkan

osuutta. Puhuttaessa hakepolttoaineesta onkin tärkeää tietää, mistä raaka-aineesta hake on tehty. Kokopuuhakkeen tuhkapitoisuus vaihtelee 0,4 – 0,6 % välillä, kun hakkuutähdehakkeessa tuhkaa voi olla jopa 6 %. (Alakangas 2000, 30–38.)



Kuva 2. Puun koostumus (Alakangas 2000, 35)

Tuhkan tärkeimpänä ominaisuutena on tuhkan sulamiskäyttäytyminen. Tuhkan sulaminen aiheuttaa kuonaantumista, sintraantumista sekä likaantumista. Nämä ominaisuudet otetaan huomioon, kun energiantuotantolaitteistoa suunnitellaan. Kuonaantuminen tapahtuu energiantuotantolaitteen tulipesässä eli säteilyalueella. Likaantuminen tapahtuu konvektio-osassa. (Alakangas 2000, 31.)

Tuhka aloittaa sintraantumisen 900 – 1000 °C lämpötilassa. Korkeassa lämpötilassa kiinteät tuhkapartikkelit törmäävät lämpöpintoihin ja tarttuvat niihin kiinni. Sintraantuminen alkaa, mikäli lämpöpintoja ei puhdisteta riittävän usein. Sintraantumisessa tuhkapartikkelit takertuvat kiinni toisiinsa ja koventuvat kiinteiksi massoiksi. Kiinteät massat toimivat lämpöpinnoilla eristeen tavoin, jolloin lämmön siirtyminen heikkenee. (Alakangas 2000, 15–57.)



Tuhkan sulaminen aiheuttaa suuria ongelmia polttolaitteissa. Polttolaite tulee suunnitella siten että tuhkan sulamista ei pääse tapahtumaan. Tuhkan sulaminen tapahtuu suurissa lämpötiloissa, 1100 – 1500 °C :ssa. Tuhka sulaa ja muodostaa suuria kasaantumia, jotka jäätyessään kovettuvat. Kovettunut sula on erittäin vaikea poistaa polttolaitteesta. Tuhkan sulamisen seurauksena esim. primääri-ilman kulkeutuminen palamisprosessiin voi estyä. Sula tuhka voi myös tuhota kattilan arinarautoja, jolloin arinarauta on vaihdettava. Arinarautojen sulaminen myös aiheuttaa prosessin alasajon. (Alakangas 2000, 15–57.)

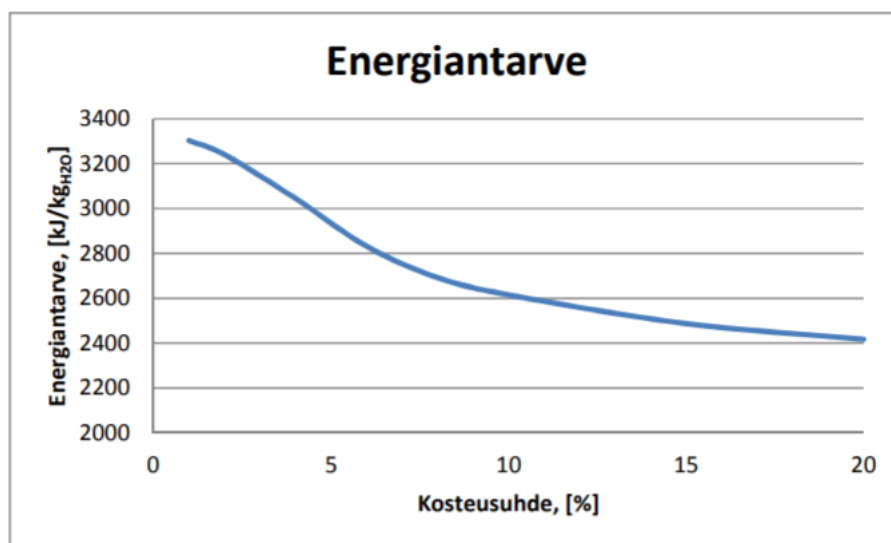
## 2.2 Puun energiasisältö

Tuoreen puun kosteus suhteessa kokonaismassaan on tavallisesti 40- 60 % riippuen puulajista sekä vuodenajasta. Jos puuta halutaan käyttää tehokkaasti energian tuotannossa, tulee siitä poistaa ensin ylimääräinen kosteus. Yleensä puu kuivataan rankana. Puuta kuivattaessa siitä poistuu ensin vapaa vesi. Luonnonkuivauksella rankojen kosteus laskee ensimmäisenä kesänä noin 30 %:iin ja jatkettaessa luonnonkuivausta toisen kesän kosteus laskee 20 %:iin. Puun tullessa tätä kuivemmaksi vesi alkaa poistua puun soluseinämistä. Mikäli tämä vesi halutaan poistaa puusta, tarvitaan kuivaukseen erillinen kuivuri.

Kiinteän puupolttoaineen energiasisältö massa yksikköä kohden on sitä suurempi, mitä vähemmän puussa on vettä. Puussa olevan vapaan veden höyrystämiseen kuluu energiaa vähintään 2260 kJ/kg. Lisäksi tämä vesi pitää lämmittää vallitsevasta lämpötilasta 100 °C:seen . Kuivattaessa puuta vapaan veden poistuttua tarvitaan kuivattamiseen lisää energiaa. (Alakangas 2000, 39.)

Kuten kuvasta 3 voidaan todeta, että tarvitaan puun kuivattamiseen enemmän energiaa kuin vapaan veden poistamiseen. Kuivattamiseen tarvittavan energian tarve kasvaa suhteellisen tasaisesti 20 % -> 7 %, jonka jälkeen kuivattamiseen tarvittava energiamäärä kasvaa merkittävästi. Energiantuotannossa yleisesti

puun kosteus-% on 25 – 45 %. Puun kaasutuksessa vaadittu polttoaineen kosteus on yleensä 15 – 25 %.



Kuva 3. Veden poistamiseen tarvittava energiantarve (Ojalainen 2013, 19)

Puussa oleva vesi on joko solurakenteissa tai vapaata vettä. Puun kosteutta määriteltäessä on kaksi erilaista kosteutta. Puussa olevan veden määrä verrattuna kokonaismassaan, kosteus  $w_k$  ja kosteussuhde  $w_s$  veden ja kuiva-aineen välillä. Kosteus  $w_k$  on aina pienempi kuin 100 %. Kosteussuhde voi olla yli 100 %. Yleisesti polttoaineen kosteudesta puhuttaessa puhutaan veden määrästä suhteessa kokonaismassaan. Kosteus lasketaan kaavalla 1. (Härkönen 2012, 9.)

$$w_k = \frac{m_p - k_p}{m_p} \times 100 \quad [1]$$

jossa  $w_k$  on kosteus, %  
 $k_p$  näytteen kuivapaino, g  
 $m_p$  näytteen märkäpaino, g

Suhteellinen kosteus lasketaan kaavalla 2.

$$w_s = \frac{w_k}{1-w_k} \quad [2]$$

jossa  $w_s$  on suhteellinen kosteus, %

Veden ominaislämpökapasiteetti on 4,19 kJ/kgK eli lämmitettäessä 1 kg vettä yhden °C, tarvitaan energiaa 4,19 kJ. Jos polttoaineessa oleva vesi on jäässä, tämän jään sulamiseen tarvitaan energiaa 333 kJ/kg. Laskettaessa saapumistilaisen polttoaineen tehollista lämpöarvoa laskennassa ei oteta huomioon veden lämmittämiseen kuluva energia. Laskennassa polttoaineen lämpötila on 25 C.

### 2.3 Kalorimetrinen lämpöarvo eli ylempi lämpöarvo HHV

Puun energiasisällön määrittämien alkaa kalorimetrinen eli ylempään lämpöarvon määrittämisellä. Tämä lämpöarvo määritetään kalorimetrillä. Kalorimetrinen lämpöarvo kertoo, kuinka paljon energiaa vapautuu, kun esimerkiksi 1 g polttoainetta palaa täydellisesti. Kalorimetri myös määrittää näytteen kosteuden. Näyte on ilma-kuiva. Tuloksena ilmoitetaan kahden rinnakkain määritetyn näytteen keskiarvo. Ylempi lämpöarvo lasketaan kaavalla 3. (Alakangas 2000, 28.)

$$Q_{gr,d} = Q_{gr,ad} \times \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad [3]$$

jossa  $Q_{gr,d}$  on kuiva-aineen kalorimetrinen lämpöarvo (MJ/kg)

$Q_{gr,ad}$	on ilmakeivän näytteen kalorimetrinen lämpöarvo (MJ/kg)
$M_{ad}$	on ilmakeivän näytteen analysikosteus (%)

## 2.4 Tehollinen eli alempi lämpöarvo LHV

Absoluuttisen kuivan polttoaineen tehollinen lämpöarvo saadaan kaavan 3 mukaisesti. Laskettaessa tehollista lämpöarvoa otetaan huomioon polttoaineen ja vedyn palamisessa syntyvien savukaasujen mukana poistuva vesihöyry. Alempi lämpöarvo lasketaan kaavalla 4. (Alakangas 2000, 29.)

$$Q_{net,d} = Q_{gr,d} - 0,02441 \times M \quad [4]$$

jossa	$Q_{net,d}$	on kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo (MJ/kg)
	$Q_{gr,d}$	on kuiva-aineen kalorimetrinen lämpöarvo (MJ/kg)
	0,02441	on veden höyrystämiseen kuluva energia (MJ/kg)
	M	on polttoaineen kuiva-aineen sisältämän vedyn palaessa syntynyt vesimäärä (%)

Pienet energiantuotantolaitokset eivät omista kalorimetriä, koska kalorimetrit ovat niin kalliita, ettei sen hankkiminen ole taloudellisesti järkevää.

Saapumistilassa olevan polttoaineen energiasisällön määrittäminen on kuitenkin erittäin tärkeää näille laitoksille, koska suurin osa polttoaineen toimitussopimuksista on sidottu toimitettuun energiamäärän. Suomessa käytetään yleisesti saapumistilassa olevan polttoaineen tehollisen lämpöarvon energiasisällön laskemiseen taulukkoarvoa. Taulukkoarvolla saavutetaan riittävä tarkkuus laskettaessa saapumistilassa olevan polttoaineen tehollinen lämpöarvo.

Kuten taulukosta 1 huomataan, eri puupolttoaineiden tehollinen lämpöarvo vaihtelee 18,6 – 20 MJ / kg. Mikäli polttoaineen alkuperä ei ole tiedossa, käytetään laskettaessa yleisesti tehollisena lämpöarvona 19.1 MJ / kg. Saapumistilassa olevan polttoaineen tehollinen lämpöarvo lasketaan kaavalla 5. (Alakangas 2000, 29.)

$$Q_{net,ar} = Q_{net,d} \times \frac{100-w_k}{100} - 0,02441 \times w_k \quad [5]$$

jossa  $Q_{net,ar}$  on saapumistilassa olevan polttoaineen tehollinen lämpöarvo (MJ/kg)

$Q_{net,d}$  on kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo

$w_k$  on polttoaineen kosteus  $w$  saapumistilassa (%),

0,02441 on veden höyrystämiseen kuluva energia. (MJ/kg)

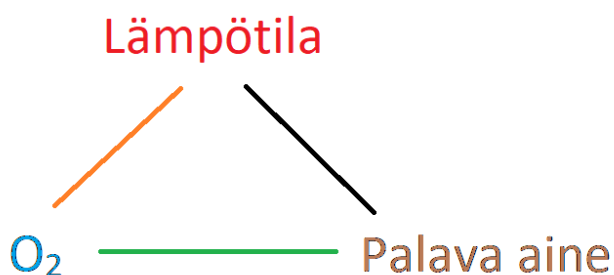
Taulukko 1. Puun osien teholliset lämpöarvot MJ / kg (Alakangas 2000, 42)

Puulaji	Rungon puuaine	Rungon kuori	Koko runko	Latvus	Lehdet/Neulas et	Kokopuu	Kannot
Mänty (Pinus sylvestris), pienpuu Varttunut puu	19,31	19,53	19,33 19,55	20,23 20,09	21,00 21,04	19,53 19,63	22,36
Kuusi (Picea abies) pienpuu varttunut puu	19,05	18,80	19,02 19,16	19,77 19,41	19,22 19,19	19,29 19,24	19,18
Hieskoivu (Betula Pubescens), pienpuu varttunut puu	18,62	22,75	19,19 19,06	19,94 19,33	19,77 19,36	19,30 19,09	18,61
Rauduskoivu, (Betula pendula) pienpuu varttunut puu	18,61	22,53	19,15 18,96	19,53 19,61	19,72 19,76	19,21 19,05	18,50
Harmaaleppä (Alnus incana); pienpuu varttunut puu	18,67	21,57	19,00 19,14	20,03 19,74	20,57 20,54	19,18 19,22	19,27
Tervaleppä (Alnus glutinosa), pienpuu varttunut puu	18,89	21,44	19,31 18,90	19,37 19,47	20,08 19,78	19,31 19,00	18,91
Haapa (Populus tremula), pienpuu varttunut puu	18,67	18,57	18,65 18,62	18,61 18,96	19,18 19,02	18,65 18,66	18,32

### 3. Palaminen

#### 3.1 Palamisen perusteet

Palaminen on kemiallinen reaktio, jossa aine yhdistyy happeen. Jotta palaminen on mahdollista, tarvitaan riittävän korkea lämpötila, happea sekä palavaa ainetta kuvan 4 mukaisesti. Palamista ei tapahdu ilman, että nämä kaikki kolme elementtiä ovat paikalla.



Kuva 4. Palamisen edellytykset

Palamiseen tarvittava happi tulee ilmasta, jossa on happea n. 20,9 %. Lämpö saadaan alkuun sytykkeestä, ja palamisen käynnistyttyä palamisessa vapautunut lämpöenergia tuo palamisreaktioon lisää lämpöä. Palava aine voi olla lähes mitä vain palavaa materiaalia.

Syttymislämpötila on alin lämpötila, jossa palava aine syttyy.

Itsesyttymislämpötila on lämpötila, jossa tapahtuu aineen ns. itsesytyminen, ilman kipinää tai liekkiä. Eri aineilla on eri syttymislämpötilat.

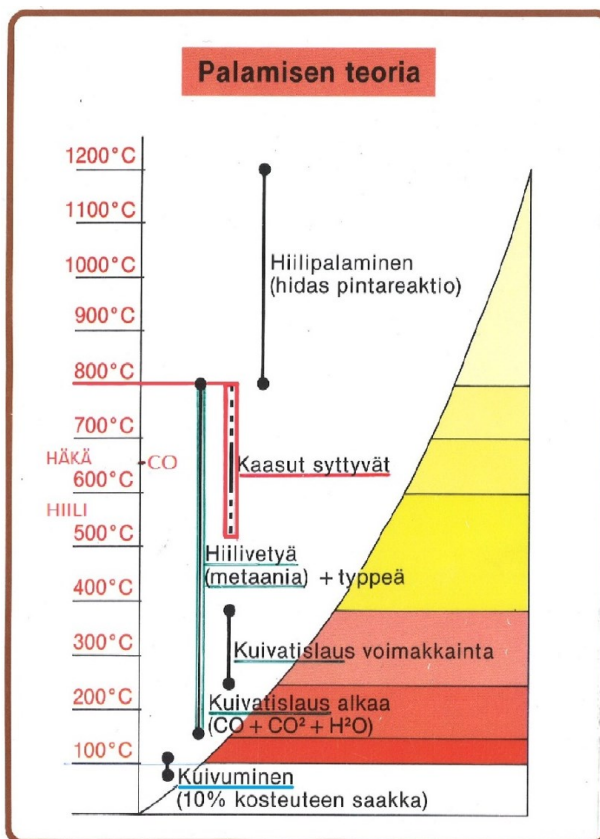
Polttoaineen palaminen voidaan jakaa neljään päävaiheeseen, jotka ovat:

1. kuivuminen
2. pyrolyysi
3. haihtuvien aineiden palaminen
4. hiilipalo.

Polttoaineen kuivuminen alkaa 70 °C lämpötilassa ja kuivuminen on tehokkainta n. 110 °C lämpötilassa. Kuivumista voidaan edesauttaa puhaltamalla polttoaineeseen ilmaa. Lisäksi palotapahtuman jo ollessa käynnissä palamisen tuottama lämpö kuivattaa polttoainetta säteilemällä. (Energialoudellinen yhdistys 1987, 45.)

Pyrolyysi alkaa n. 150 °C lämpötilassa ja on voimakkaimmillaan 250 °C – 380 °C lämpötilassa. Pyrolyysin aikana kiinteä aine hajoaa ja muuttuu kaasumaiseksi. Pyrolyysissa puusta muodostuu pääasiassa häkää (CO), vetyä (H<sub>2</sub>) sekä erilaisia hiilivetyjä (C<sub>x</sub>H<sub>x</sub>). Pyrolyysi loppuu n. 800 °C lämpötilassa. Pyrolyysissä muodostuneet kaasut aloittavat itsesyttymisen n. 530 °C asteen lämpötilassa. Puukaasun merkittävin palava kaasu on vety. Vedyn itsesyttymislämpötila on 571 °C. Toinen merkittävä pyrolyysissä syntyvä kaasu on häkä. Häkäkaasun itsesyttymislämpötila on 650 °C. Kuvan 5 mukaan kaikki palavat kaasut syttyvät lämpötilan ollessa 800 °C. (Energialoudellinen yhdistys 1987, 45 – 46.)

Hiilipalo on hidas pintareaktio, joka syntyy korkeassa lämpötilassa. Hiilipalossa puussa oleva kiinteä hiili alkaa hehkumaan. Hiilipalon lämpötila-alue on 800 – 1200 °C. (Energialoudellinen yhdistys 1987, 46.)



Kuva 5. Palamisen vaiheet (Energialoudellinen yhdistys 1987, 45)

### 3.2 Puukaasun ominaisuudet

Puukaasu eli puusta saatava tuotekaasu koostuu samoista alkuaineista kuin puu. Yleisesti kaasutettaessa puuta käytetään ilmaa. Ilmassa on happea n. 20,9 % ja typpeä 78 %. Muita aineita ilmassa on n. 1 %. Puuta kaasutettaessa kaasun mukaan tulee myös ilmassa oleva typpi ( $N_2$ ). Kaasutus voidaan myös toteuttaa ns. happikaasutuksena, jolloin kaasuttamisen tapahduttua hapella tuotekaasuun ei tule ilman sisältämää typpeä. Puukaasun eli tuotekaasun tavallinen ainejakauma on kuvattu taulukossa 2.

#### Taulukko 2. Puukaasun koostumus

(Raiko, Kurki-Suonio, Saastamoinen & Hupa 2002, 180)

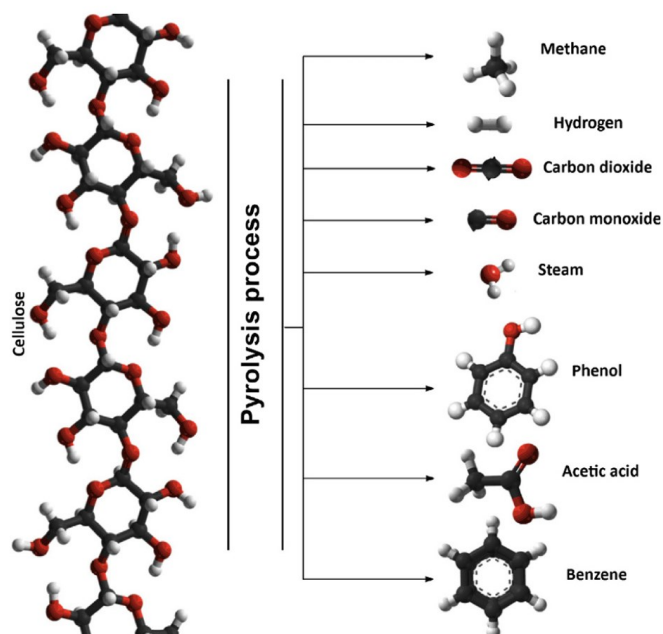


Aine	Määrä
CH <sub>4</sub>	1-6 til-%
H <sub>2</sub>	8-20 til-%
CO	10-20 til-%
CO <sub>2</sub>	9-15 til-%
N <sub>2</sub>	42-56 til-%
H <sub>2</sub> O	0-27 til-%
Lämpöarvo	3,3-5,1 MJ/Nm <sup>3</sup>

Puukaasun koostumukseen vaikuttavat muun muassa kaasutustekniikka, kaasutuksessa käytetyt parametrit. Koostumukseen vaikuttavat myös puulaji sekä kuoren ja neulasten määrä kaasutettavassa aineessa sekä kaasutettavan aineen palakoko.

### 3.3 Pyrolyysi eli kuivatistaus

Pyrolyysi on kemiallinen reaktio, jossa kuumentamalla orgaanista ainetta, esim. biomassaa, kiinteä aine hajoaa ja muodostaa muita aineita. Kuumennettaessa biomassaa pyrolyysin aikaansaamiseksi, itse kuumennus tehdään ilman happea tai hapen määrä on rajoitettu. (Granö 2009, 1.)



Kuva 6. Selluloosan hajoaminen pyrolyysireaktiossa (Basu 2018, 156)

Pyrolyysia hallitaan erilaisin keinoin. Näitä keinoja ovat mm.

- reaktorin rakenne ja tyyppi
- lämpötila
- raaka-aine sekä laatu
- raaka-aineen viipymä reaktorissa
- lisäaineet. (Granö 2009, 1.)

Pyrolyysi voidaan jakaa kolmeen erilliseen pyrolyysiin: hidas-, nopea-, ja flash-pyrolyysi. Haluttu lopputuote vaikuttaa siihen, minkälainen pyrolyysi ja prosessi halutaan ottaa käyttöön. Taulukossa 3 on esitetty pyrolyysi erilaisissa olosuhteissa.

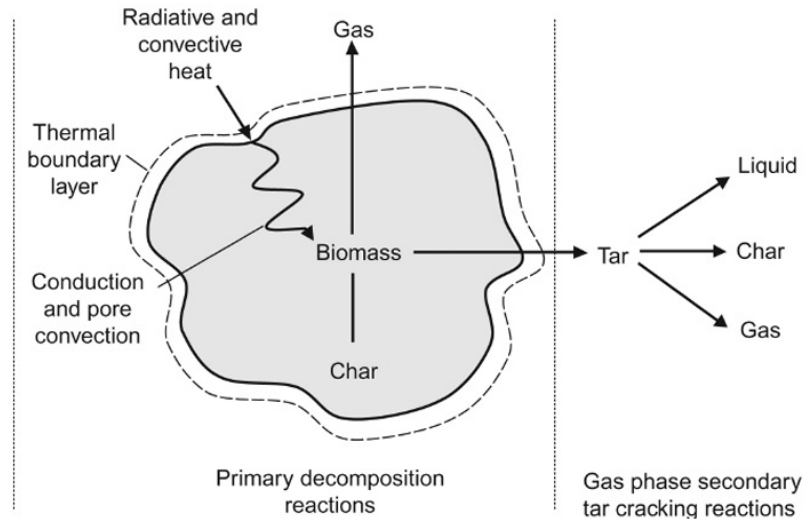
Taulukko 3. Pyrolyysin olosuhteet hitaassa, nopeassa ja flash-pyrolyysissä.  
(Pieniniemi & Muilu 2011, 42)

	Hidas pyrolyysi	Nopea pyrolyysi	Flash pyrolyysi
Pyrolyysin lämpötila (°C)	300–700	600–1000	800–1000
Lämmitys (°C/s)	0.1–1	10–200	>1000
Partikkelikoko (mm)	5–50	<1	<0.2
Kiinteä viipymäaika (s)	300–550	0.5–10	<0.5

Hidasta pyrolyysia on käytetty pitkään tuottamaan puuhiiltä. Nopeaa pyrolyysiä käytetään nestemäisen bioöljyn tuotantoon. Flash-pyrolyysi on käytännössä parannettu versio nopeasta pyrolyysistä. (Pieniniemi & Muilu, 41.)

Lämpötilan noustessa korkeaksi tervojen muodostus lisääntyy. Tervat ja tervaantuminen prosessin eri vaiheissa ovat suurimmat ongelmat bioperäisten polttoaineiden kaasutuksessa. Terva mm. tukkii putkistoja, venttiileitä sekä suodattimia, joita käytetään kaasutusprosessin eri vaiheissa ja jatkojalostuksessa. (Pieniniemi & Muilu, 43.)

Kuten kuvassa 7 on esitetty, biomassaan tuodaan lämpöä, jolla saadaan aikaan pyrolyysi. Biomassan kiinteä aine alkaa kaasuuntumaan ja siitä muodostuu hiiltä, kaasua ja tervoja. Tervojen krakkaus tapahtuu korkeassa lämpötilassa, ja ne hajoavat eri olomuotoihin. Nestemäinen olomuoto tunnetaan paremmin bioöljynä. Hiili tunnetaan biohiilenä, jonka hiilipitoisuus on n. 85 %. Kaasuista osa kondensoituu jäähtyessään nestemäiseksi, ja nämä käytännössä lisätään nestemäiseen osuuteen. Kaasut koostuvat hiilidioksidista, vedestä, häkäkaasusta sekä erilaisista hiilivetyketjuista. (Basu 2018, 159–160.)



Kuva 7, Biomassan pyrolyysiprosessi (Basu 2018, 159)

### 3.4 Kaasutusreaktiot

Eri aineet sisältävät eri määrän kemiallista energiaa. Tätä energiaa kutsutaan entalpiaksi. Vedyn palamisessa syntyy kemiallinen reaktio vedyn ja hapen yhtyessä toisiinsa. Tässä prosessissa osa energiasta vapautuu lämpöenergiana ja syntyvä palamistuote on vesi. Vedyn ja hapen entalpia on suurempi kuin veden. Tässä reaktiossa on tapahtunut entalpian muutos. Eksotermisessä reaktiossa lopputuotteen entalpia on pienempi kuin alkuperäinen entalpia. Endotermisessä reaktiossa entalpia on suurempi kuin alkuperäinen entalpia. Entalpian muutos tarkoittaa sitä, kuinka paljon kemiallisessa reaktiossa vapautuu tai sitoutuu energiaa. (Bhattacharyya & Bera 2009, 63–68.)

Pyrolyysistä jäljelle jäävä hiili eli jäännöshiili ei välttämättä ole puhdasta hiiltä vaan se sisältää myös erilaisia hiilivetyjä sekä happea. Tämä jäljelle jäänyt hiili (kuva 7.) kaasutetaan korkeassa lämpötilassa, jolloin se muodostaa lisää tuotekaasua. Biomassan kaasutuksessa tapahtuu paljon erilaisia kemiallisia reaktioita, joista tärkeimmät ovat (Basu 2018, 161.):

- Boudouard-reaktio

- Boudouard reaktio tunnetaan yleisemmin hiilidioksidireaktiona. Hiilidioksidireaktioyhtälö on seuraava, (Basu 2018, 217.)



jossa C on hiiliatomi  
CO<sub>2</sub> on hiilidioksidi  
CO on hiilimonoksidi eli häkä.

- Vesikaasu reaktio

- Vesikaasu reaktiossa hiili reagoi veden kanssa. Vesikaasureaktion reaktioyhtälö on seuraava, (Basu 2018, 218.)



jossa H<sub>2</sub>O on vesimolekyyli  
H<sub>2</sub> on vetymolekyyli, jossa on kaksi vetyatomia.

- Metaanin muodostuminen

- Kaasutettaessa jäännöshiiltä ympäristössä, jossa on vetyä, syntyy metaania. Metaanin syntymisen reaktioyhtälö on seuraava, (Basu 2018, 219.)



jossa CH<sub>4</sub> on metaanimolekyyli eli metaani.

- Vaihtoreaktio

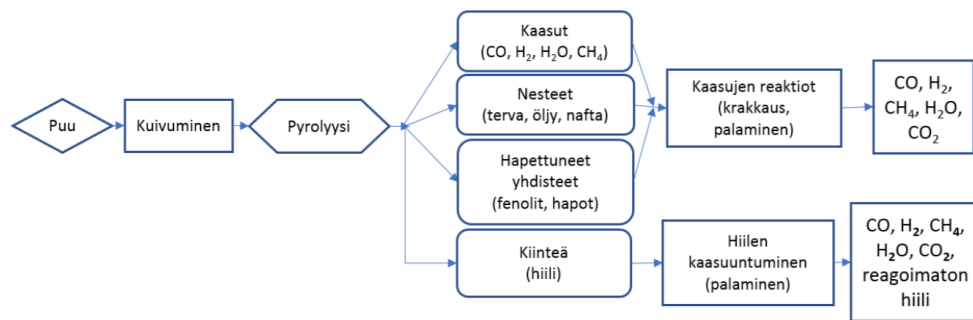
- Vaihtoreaktiota tapahtuu vain silloin, kun kaasutus tapahtuu höyryllä. Tässä reaktiossa reaktiot tapahtuvat kaasufaasissa. Tämän reaktion johdosta vetyttöisyys nousee ja häikäpitoisuuden laskiessa. Vaihtoreaktion reaktioyhtälö on seuraava, (Basu 2018, 219.)



### 3.5 Kaasutus prosessi

Kaasutusprosessi alkaa polttoaineen kuivauksella. Kuvassa 8 on esitetty tuotekaasun syntyprosessi. Puun kaasutusprosessin peruseräatit voidaan jakaa seuraavasti:

- kuivaus,
- pyrolyysi
- hiilen kaasuuntuminen.



Kuva 8. Tuotekaasun syntyprosessi. (Basu 2013, 214)

Yleisesti kaasutusprosesseissa käytetään polttoaineena haketta. Haketta ei kuivata luonnonmukaisesti hakkeena vaan kuivaus tapahtuu rankakasoissa. Rankakasat voidaan myös peittää, jolloin rangat ovat n. 10 % kuivemmat kuin peittämättömät rangat. Ensimmäisen kesän jälkeen luonnonkuivauksella polttoaineen kosteus on n. 30 %. Mikäli luonnonkuivausta tehdään toisen kesän yli, päästään kosteusprosentissa n. 20 %:n kosteuteen. Mikäli kosteutta halutaan vielä tämän jälkeen poistaa polttoaineesta, pitää käyttää kuivuria. (Raitila 2009, 11.)

Alla taulukko CENTRIA:n puukaasuttimella kaasutetun kaasun koostumuksesta. Polttoaineena on käytetty haketta, jonka kosteus on 30-40 %.

Taulukko 4. Tuotekaasun ominaisuudet (Lassi 2011, 48)

Tuotekaasun komponentti	til-%	g/Nm <sup>3</sup> (NTP 0°C, 1 atm)
CO	15	187
H <sub>2</sub>	15	14
CH <sub>4</sub>	2.5	18
CO <sub>2</sub>	15	295
N <sub>2</sub>	50	
Muut kaasukomponentit	2.5	

## 4. Kaasutintyytit

### 4.1 Kiinteäkerroskaasuttimet

Kiinteäkerroskaasutus on ollut perinteinen tapa toteuttaa biomassan, etenkin puun kaasutus. Kiinteäkerroskaasutin on yleisimmin käytössä oleva kaasutin. Kiinteäkerroskaasuttimet ovat yksinkertaisia valmistaa ja käyttää suhteellisen hyvällä lämmön hyötysuhteella. Kiinteäkerroskaasuttimet eivät myöskään tarvitse suurta polttoaineen esikäsittelyä, tosin polttoaineen kosteus tulisi olla alle 30 %. Kuivemmalla polttoaineella saadaan kuitenkin aikaan parempi hyötysuhde. Myös tervojen muodostuminen tuotekaasuun jää pienemmäksi. Kiinteäkerroskaasuttimia käytetään yleensä alle 10 MW teholuokassa. Kiinteäkerroskaasuttimet jaetaan pääsääntöisesti kahteen luokkaan, myötävirta- ja vastavirtakaasuttimiin. (Pandey, Bhaskar, Stöcker & Sukumaran, 2015, 215.)

### 4.2 Myötävirtakaasutin

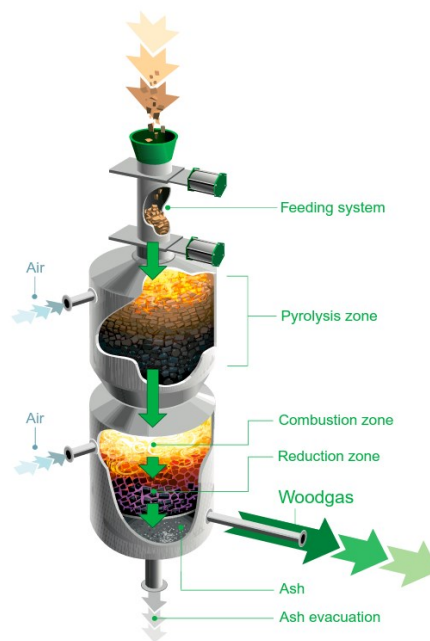
Myötävirtakaasuttimessa polttoaine ja tuotekaasu kulkevat samaan suuntaan (kuva 9). Myötävirtakaasutinta käytetään yleisimmin CHP-tuotannossa (Combined Heat and Power), missä tuotetaan sähköä ja lämpöä. Polttoaineen syöttö tapahtuu kaasutusreaktorin yläosaan, josta polttoaine valuu alaspäin.

Kaasuttamiseen käytettävä ilma syötetään myös yläosaa ja tuotekaasu poistuu polttoaineen virtaussuunnan mukaisesti reaktorin alaosasta.

Myötävirtakaasuttimen polttoaine pitää olla kuivaa. Yleisesti kosteus saa olla korkeintaan 25 %. Polttoaineen palakoko pitää myös olla tasalaatuista. (Pandey ym. 2016, 216.)

Tuotekaasun tervapitoisuus on suhteellisen pieni. Koska tervayhdisteet hajoavat korkeassa lämpötilassa, tuotekaasu johdetaan paloalueen läpi, missä on korkea lämpötila, 1000 – 1400 °C. (Pandey ym. 2015, 215–216)

Myötävirtakaasuttimesta saatavan tuotekaasun tervapitoisuus on n. 1 g/Nm<sup>3</sup>. (Basu 2013, 273)



Kuva 9. NOTAR© Myötävirtakaasutin (Pandey ym. 2015, 218)

Kuvassa 9 on myötävirtakaasutin, jossa kaasutusreaktori on jaettu kahteen osaan. Polttoaine syötetään ylempään kammioon, johon tuodaan primääri-ilma. Ylempi kammio on pyrolyysialue. Perinteisessä myötävirtakaasuttimessa ilma tuodaan vain yhteen osaan reaktorin yläosassa. (Pandey ym. 2015, 219.)

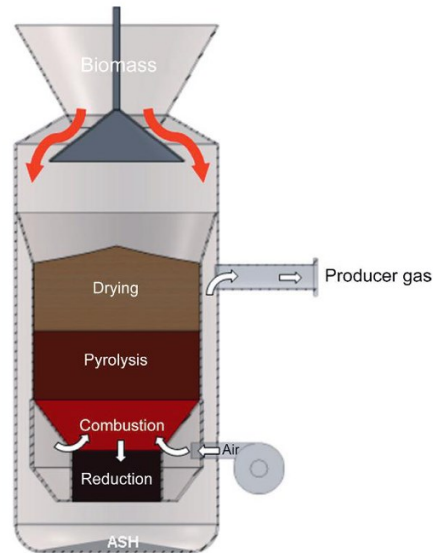


Alemmassa kammiossa on paloalue, jossa osa polttoaineesta palaa ja tuottaa tarvittavan lämpöenergian kaasutusprosessiin. Paloalueen yläosassa on toinen ilman syöttöputki – sekundääri-ilma. Kaasutus ja tuotekaasun pelkistyminen tapahtuvat paloalueen alapuolella. Kaasutusreaktio tapahtuu kiinteässä kerroksessa, johon tulee jatkuva jäännöshiilen syöttö yläpuolelta, pyrolyysin läpikäyneestä hakkeesta. Polttoaineessa oleva tuhka poistetaan reaktorin alaosaan. (Pandey ym. 2015, 219.)

### **4.3 Vastavirtakaasutin**

Nimensä mukaan vastavirtakaasuttimessa syötettävä polttoaine ja syntyvä tuotekaasu kulkevat vastavirtaan. Kuvassa 10 esitetään vastavirtakaasuttimen toimintaperiaate. Siinä polttoaine syötetään kaasuttimen yläosaan ja kaasuttamiseen tarvittava ilma syötetään reaktorin alaosaan. Tuotekaasu kulkee polttoainevirtaa vastaan ja poistuu kaasuttimen yläosasta.

Vastavirtakaasuttimet sopivat hyvin lämmöntuotantoon, mutta sähköntuotannossa kaasuttimien käyttö vaatii tuotekaasun käsittelyjärjestelmiä. Erityisesti tervan poistaminen tuotekaasusta vaatii oman järjestelmän, mikäli tuotekaasua halutaan käyttää sähköntuotannossa. Vastavirtakaasuttimen etuja ovat yksinkertainen rakenne sekä laaja skaala polttoaineen laadussa, etenkin polttoaineen kosteudessa. (Pandey ym. 2015, 217.)



Kuva 10. Vastavirtakaasutin (A. Pandey ym, 2015, 217)

Kuvan 10 mukaan vastavirtakaasuttimen reaktorin toiminta voidaan jakaa neljään eri alueeseen:

1. kuivaus
2. pyrolyysi
3. polttoaineen hapetus ja palaminen
4. pelkistyminen.

#### 4.4 Leijutuskaasutin

Leijutuskaasuttimen reaktorissa on hienojakoista hiekkaa, jonka lämpötila säädetään polttoaineen mukaan. Käytettäessä biomassaa polttoaineena, lämpötila halutaan pitää kuitenkin alle 900 °C:ssa, jotta vältetään tuhkan sulaminen ja kasautuminen suuremmiksi massoiksi. Leijukaasutuksessa polttoaine ja kuuma petimateriaali (hiekkä) sekoittuvat keskenään ja polttoaine kaasuuntuu lämmön ja alapuolelta puhallettavan ilman vaikutuksesta.

Leijukattilaan syötettävä polttoaine murskataan alle 10 mm:n kokoisiksi palasiksi. Leijutustekniikalla saadaan laadukasta tuotekaasua. Tuotekaasun tervämäärä on pieni n. 10 g/Nm<sup>3</sup>. Leijutuskaasuttimet voidaan jakaa kahteen

päätyyppiin, leijupetikaasutus ja kiertopetikaasutus. Leijutuskaasuttimet eivät sovi hyvin pieniin kokoluokkiin, koska investointikustannukset ovat suhteellisen kalliita. (Basu 2013, 273.)

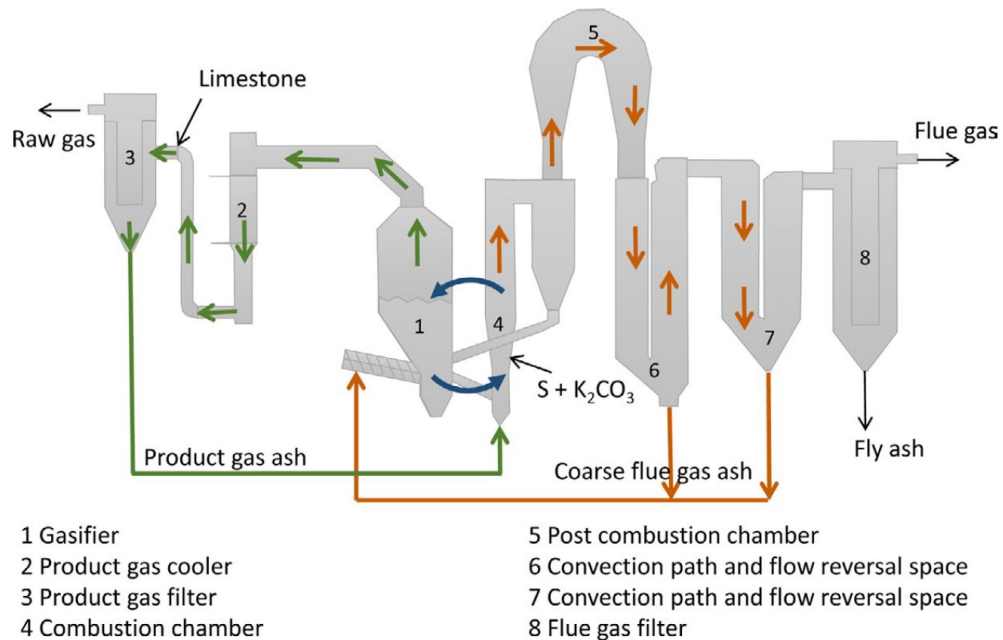
Leijupetikaasutuksessa kaasuttimen pohjalla olevaan hienojakoiseen hiekkaan puhalletaan ilmaa kaasuttimen alaosasta. Tämä saa hiekan ”leijumaan” pohjan yläpuolella. Leijuvan hiekan sekaan syötetään polttoaine, joka kaasuuntuu kuuman hiekan ja pohjalta tulevan ilman vaikutuksesta. Kaasutusreaktiot tapahtuvat samalla tavalla kuin myötävirtakaasuttimessa. Leijupetikaasutusta käytetään alle 25 MW:n teholuokassa. (Basu 2013, 274.)

Kiertopetikaasutuksen toimintaperiaate on samantyyppinen kuin leijupetikaasutuksessa. Kiertopetikaasuttimessa käytetään hieman hienojakoisempaa hiekkaa, ja kaasuttimen alaosaan puhalletaan ilmaa moninkertaisella voimakkuudella. Tämä saa hiekan ja polttoaineen kiertämään kaasuttimessa. Kiertopetikaasutuksessa polttoaineen viipymä reaktorissa on suuri, jolloin kaasuuntuminen on parempaa. Kiertopetikaasutustekniikkaa käytetään suurissa teholuokissa. Vaasassa otettiin käyttöön vuonna 2013 sen hetkinen maailman suurin kiertopetikaasutuslaitos, jonka polttoaineteho on 140 MW. (Basu 2013, 275.)

Kaksoisleijukaasutin on kehitetty tuotekaasun jalostamista ajatellen. Taustalla on ajatus käyttää biopolttoaineista, lähinnä metsätähteistä, saatua biomassaa synteettisen metaanin tuotantoon. Kaksoisleijukaasutustekniikkaa pilotoitiin Ruotsin Göteborgissa GoBiGas -hankkeessa. Demonstraation tarkoituksena oli tuottaa synteettistä metaania puhtaasti liiketaloudellisesti. Pilottihankkeessa Valmetin toimittaman kaasuttimen koko oli 20 MW biometaania. Tuotekaasun metanointi toteutettiin katalyyttisellä menetelmällä. (Larsson A, Gunnarsson I & Tenberg, F 2018, 1.)

Hankkeessa demonstroitiin, että synteettisen metaanin tuottaminen biomassasta on mahdollista. Hanke kuitenkin yllättäen lopetettiin maaliskuussa

2018, kun hankkeelle ei enää myönnetty lisärahoitusta. Laitoksella tuotettiin 65 GWh synteettistä biometaania. Demonstraatiolaitos on kuitenkin mahdollista ottaa uudelleen käyttöön. (Thunman ym. 2018, 15.)



Kuva 11. Kaksoisleijupetikaasuttimen toimintaperiaate. (Thunman ym. 2018, 13)

Kaksoisleijukaasutuksessa toiminta perustuu kahteen leijureaktoriin. Toinen toimii perinteisenä kiertopetikattilana, jossa kaasuttimen petimateriaali kuumennetaan halutun lämpöiseksi (4). Kuumennettu hiekka siirretään syklonista toiseen leijupetikaasuttimeen (1), jossa se toimii lämmön lähteenä, katalyyttinä ja reaktiivisten jakeiden kuljettajana. Kiinteä polttoaine syötetään kaasutusreaktoriin (1). Kaasutusreaktoriin tuotu kuuma hiekka toimii lämmönlähteenä kaasutuksessa. Tuotekaasu siirretään jäähdyttimeen, jossa se jäähdytetään haluttuun lämpötilaan, alle 230 °C (2). Tuotekaasun mukana tuleva lentotuhka erotetaan tuotekaasusta ja siirretään takaisin leijupetikattilaan (3). Katalyyttisen menetelmän vuoksi leijukattilaan lisätään myös rikkiä sekä kaliumkarbonaattia. Kiertopetikaasuttimen (4) pääpolttoaine on kaasutuksesta (1) jäävä jäännöshiili. Kiertopetikattilasta lähtevät kaasut ja palavat partikkelit poltetaan jälkipolttokammiossa (5). Kuumat savukaasut siirtyvät tästä konvekto-

osaan, jossa lämpö otetaan talteen ja käytetään kaukolämpöverkossa (6 ja 7). Konvektio-osista poistuva karkea lentotuhka kierrätetään takaisin polttoaineen sekaan. Hienompijakoinen lentotuhka poistetaan savukaasuista multisyklonilla (8). (Thunman ym. 2018, 12–13.)

## 5. Tuotekaasun käyttö

Puuta kaasuttamalla saadulla tuotekaasulla on monia eri käyttökohteita.

Perinteisin tapa käyttää tuotekaasua on polttaa se suoraan lämmöksi tai polttaa se CHP-yksikössä, jossa tuotetaan lämpöä sekä sähköä höyryturbiinissa.

Tuotekaasun käyttökohteita voivat olla esimerkiksi:

- poltto suoraan lämmöksi
- poltetaan CHP-yksikössä, jossa tuotetaan sähköä ja lämpöä
- kaasupolttoaine sähköntuotantoon
  - moottori
  - kaasuturbiini
- jalostus liikenteen polttoaineeksi
- jalostus kemikaaleiksi.

Jos tuotekaasua halutaan käyttää kaasumaisena polttoaineena sähköntuotannossa erilaisissa moottoreissa tai kaasuturbiineissa, sitä pitää jalostaa. Kevyin jalostus on poistaa siitä epäpuhtaudet, jolloin se soveltuu käytettäväksi moottoreissa. Tästä toimivimmat kaupalliset sovellukset ovat kehittäneet Volter Oy sekä Gasek Oy.

Tuotekaasusta voidaan jalostaa biodieseliä Fischer-Tropsch -synteisillä (FT). Synteisin kehittivät saksalaiset Franz Fischer ja Hans Tropsch vuonna 1923. FT-synteisillä voidaan saada polttoainetta n. 40 % tuotekaasun energiasta. FT-

synteessissä muodostuu suuri määrä erilaisia tuotteita. Tuotteiden osuutta kokonaisuudesta voidaan säädellä eri parametrien kautta. Tähän vaikuttavat:

- katalyyttien valinta
- Reaktio-olosuhteet (paine, lämpötila, reaktioaika)
- tuotekaasun koostumus. (Basu 2013, 431.)

Jalostettaessa tuotekaasua liikennepolttoaineeksi kaasumaiseen muotoon, siitä poistetaan kaikki epäpuhtaudet sekä nostetaan sen ominaisuudet vähintään maakaasua vastaavaksi. Tällöin voidaan puhua synteettisestä biometaanista – bio-SNG:stä. Liikenteeseen sopivan polttoaineen ominaisuuksista tärkein on metaanipitoisuus.

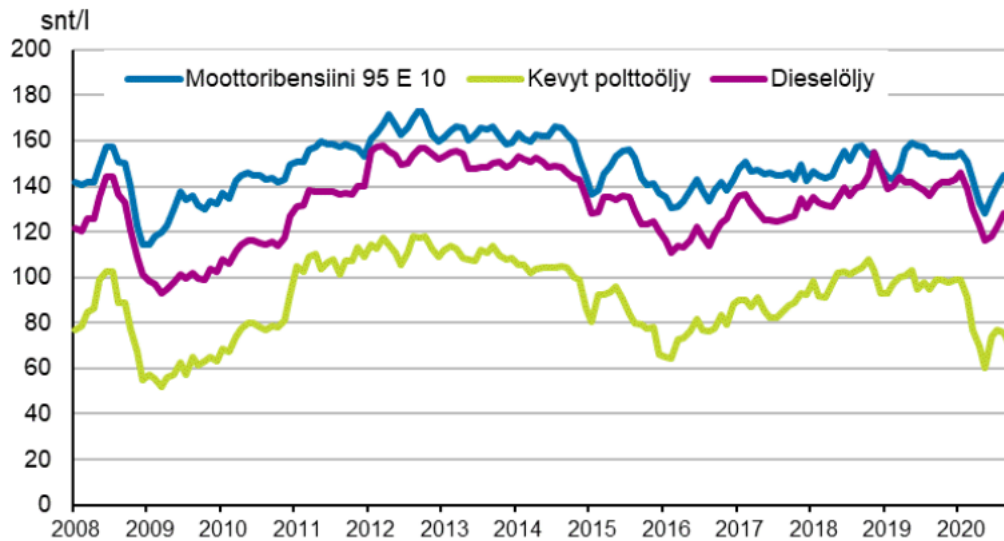
Synteettistä metaania (metanointi) voidaan tehdä tuotekaasusta kahdella eri tavalla. Jalostus voi tapahtua katalyyttisellä menetelmällä, jolloin kaasutusreaktoriin ja tuotekaasun jalostamiseen käytetään katalyytteja. Katalyyttien avulla nopeutetaan tuotekaasun kemiallisia reaktioita ja katalyyttien valinnoilla voidaan vaikuttaa syntyvien hiilivetyketjujen muodostumiseen. Tässä tapauksessa katalyyttisellä menetelmällä halutaan tuottaa metaania CH<sub>4</sub>. Tätä menetelmää käytettiin mm. GoBiGas-hankkeessa. (kts. luku 4.3)

(Basu 2013, 430.)

Toinen mahdollisuus toteuttaa tuotekaasun metanointi on bakteerit. Tuotekaasu syötetään reaktoriin, jossa on mikrobeja. Mikrobit muodostavat CO ja CO<sub>2</sub> -kaasuista yhdessä vedyn H<sub>2</sub> kanssa metaania CH<sub>4</sub>, jota voidaan käyttää liikenteen polttoaineena. Tekniikan on kehittänyt Paraisilla toimiva QPower Oy.

Tuotekaasun jalostuksessa suurin taloudellinen hyöty saadaan, kun sitä käytetään liikenteen polttoaineena korvaamaan bensiiniä tai dieseliä. Bensiinin

litrahinta kuluttajalle vaihtelee, mutta on tällä hetkellä kuvan 12 mukaan n. 145 € / MWh.



Kuva 12. Tärkeimpien öljytuotteiden kuluttajahinnat (Tilastokeskus 2021)

CHP-tuotannolla voidaan päästä jopa 90 %:n hyötysuhteeseen polttoainetehosta. Jotta CHP -tuotannosta saataisiin taloudellisesti kannattavampaa kuin liikenteen polttoaineen valmistuksesta, tulee sähkön ja lämmön ostohinnan yhteisvaikutus olla suurempi kuin jalostetun tuotekaasun käyttö liikenteen polttoaineena. Pien CHP-tuotannossa on yleisesti käytössä stirling-moottori, polttomoottori tai mikroturbiini. Näiden sähköntuotannon hyötysuhde on taulukon 5 mukaan 8 – 40 %.

Taulukko 5. Pienimuotoiseen CHP-tuotantoon soveltuvien tekniikoiden ominaisuuksia. (Karjalainen 2012,10)

Tekniikka	Polttomootorit	Mikroturbiinit	Stirling -moottorit	Polttokennot	Höyrykone ja -turbiini	ORC-prosessi
<b>Tyypillinen koko</b>	1 kWe – 1000 kWe	25 kWe – 250 kWe	10 – 150 kWe	1 kWe – 50 MWe	Höyrykoneella >100 V -turbiineilla >500 kWe	150 kWe – 1 MWe
<b>Sähköhyötysuhde</b>	25 – 40 %	25 -30 %	8 – 22 %			
<b>Lämpöhyötysuhde</b>	45 – 50 %	50 - 60 %	50 – 60 %			
<b>Tyypillinen käyttöaika</b>	15 vuotta	15 vuotta	15 vuotta	1 - 15 vuotta	15 vuotta	>20 vuotta
<b>Kehitysaste</b>	Laajasti käytössä	Varhaiskaupallisessa vaiheessa	Pilot -vaiheessa	Kehitysvaiheessa	Laajasti käytössä	Varhaiskaupallisessa vaiheessa
<b>Tärkein tekninen vahvuus pien CHP -käytössä</b>	Korkea sähköhyötysuhde	Pieni huollon tarve	Pieni huollon tarve	Korkea sähköhyötysuhde	Tekniikan todistettu toimivan	Hyvä sähköhyötysuhde myös osakuormalla
<b>Suurin tekninen heikkous pien CHP -käytössä</b>	Verrattain suuri huollon tarve	Polttoaineen oltava kaasumainen tai nestemäinen	Rajallinen sähköhyötysuhde	Lyhyt kestoikä	Sähköhyötysuhde osakuormalla	Rajallinen sähköhyötysuhde

Taulukon 5 mukaan CHP-laitoksen parhaimmaksi kokonaishyötysuhteeksi saadaan polttomoottorikäyttöinen CHP-laitos, jonka hyötysuhde on 90%. Tästä sähkön osuus on 40 % ja lämmön 50 %. Tilastokeskuksen mukaan lämmityksessä käytettävän hakkeen hinta on 22 € / MWh. (Tilastokeskus 2021) Mikäli 1 MWh polttoainetta käytetään CHP laitoksessa saadaan sillä korvattua 1 MWh x 0,5 x 22 € / MWh = 11 € lämmöntuotannossa. Sähköä saadaan tuotettua samasta polttoaineesta 1 MWh x 0,4 = 0,4 MWh. Biokaasun hinta teollisuudelle Suomen Kaasuenergian hinnaston mukaan on 58,92 € / MWh. (Suomen Kaasuenergia 2021) Jotta CHP tuotanto olisi taloudellisesti kannattavampaa tulisi sähkön hinnan olla  $(58,92€ - 11 €) / 0,4 \text{ MWh} = 119,80 € / \text{MWh}$ .

Tällä hetkellä sähkön Pohjoismaiden sähköpörssissä, Nord Pool Spot, hinta keskimäärin kuukaudessa on kuvan 13 mukaan 40 € / MWh. Sähkön siirtohintaa vaihtelee alueittain eikä sähkön siirtohintaan voi vaikuttaa. Käytetään tässä esimerkissä parhaan arvion mukaan sähkön siirtohintana 60 € / MWh. Näillä hinnoilla saadaan CHP tuotannossa yhdestä käytetystä MWh :sta polttoainetta  $0,5 \times 70 € + 0,4 \times 40 € + 0,4 \times 60 € = 75 € / \text{MWh}$ . Sähkön hinnan ja lämmöntuotannossa korvattavan kevyen polttoöljyn tulisi olla huomattavasti



kalliimpaa, jotta CHP tuotanto olisi taloudellisesti kannattavampaa kuin jalostetun tuotekaasun käyttäminen liikenteen polttoaineena.



Kuva 13. Nord Pool Spot – sähköpörssin kuukausikeskiarvot (Tilastokeskus 2021)

## 6. Turvallisuus

### 6.1 Tuotantolaitoksen yleinen turvallisuus

Energian tuotantolaitoksella on laitoskohtaiset turvallisuusohjeet. Nämä ohjeet kuitenkin ovat hyvin samankaltaisia vaikkakin niistä löytyy pieniä eroavaisuuksia. Peruseriaatteena voidaan pitää, että mitä suurempi tuotantolaitos on, sitä enemmän turvallisuuteen kiinnitetään huomiota ja sitä tarkemmat turvallisuusohjeet ovat. Vaarallisista paikoista tai laitteista varoitetaan erilaisin varoituskyltein.

Työskenneltäessä tuotantolaitoksissa lähes poikkeuksetta jokaiselta työntekijältä vaaditaan voimassa oleva työturvallisuuskortti- sekä vähintään hätäensiapu -koulutus. Työntekijöiltä voidaan myös vaatia tulityökortti sekä vesihygieniapassi.

Yleisesti tuotantolaitoksen tuotantotiloissa tulee käyttää asiaan kuuluvaa varustusta. Tähän varustukseen kuuluvat:

- EN 11612 standardin mukainen kuumuudelta ja tulelta suojaava sekä EN 20471 standardin mukainen luokan 2 huomiovaatetus
- turvakengät
- kypärä
- suojalasit
- kuulosuojaimet
- käsineet.

Varustukseen kuuluu yleensä myös työkaluja. Tuotantolaitoksella monet tilat kuten polttoaineen vastaanottoasema ja kuljettimet ovat ATEX-tiloja. ATEX-tila on räjähdysvaarallinen tila, joka säädetään Euroopan Yhteisön direktiivistä, 99/92/EY (työolosuhdedirektiivi) ja 94/9/EY (laitedirektiivi). Näissä tiloissa tulee käyttää EX-merkittyjä laitteita. Taskulamppujen ja muiden mahdollisesti kipinän aiheuttavien työkalujen tulee olla EX-merkittyjä, jotta niitä voidaan turvallisesti käyttää näissä tiloissa.

Tuotantolaitoksilla voi olla käytössä myös vaarallisia tiloja, joissa työskentelyyn tarvitsee erillisen luvan. Tällaisia tiloja ovat esim. kattilan sisäpuolella tai säiliössä työskentely. Näihin töihin tuotantolaitoksilla on omat ohjeet. Vaarallisia tiloja ovat myös polttoaineen syöttölaitteistot, joissa voi olla radioaktiivisia säteilijöitä, joita käytetään polttoaineen pinnankorkeuden mittauksissa. Säteilijöiden sijainti ja toiminta tulee olla jokaisen niiden lähistöllä työskentelevän tiedossa. Yleensä säteilijöiden säteilylähteenä toimii Cesium-137 tai Koboltti-88 kide.

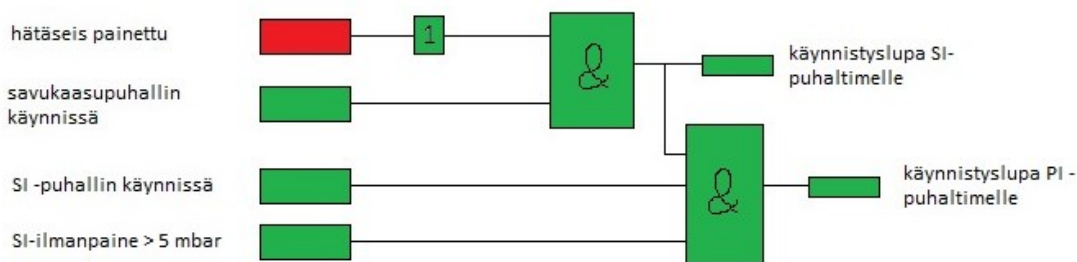
Tuotantolaitoksen osissa on erilaisia laitteistoja ja laitejärjestelmiä. Työskenneltäessä tuotantolaitoksen eri kohteissa turvallisuus otetaan huomioon monin eri tavoin. Eri työtehtävissä voidaan vaatia erityisiä suojarusteita kuten FFP3 hengityssuojaimia. Yleensä työnantaja järjestää tarvittavat suojarusteet, ja työntekijät ovat velvoitettuja käyttämään työtehtävän vaatimia suojarusteita.

Tuotantolaitoksella on paljon liikkuvia, suuria mekaanisia voimia käyttäviä laitteistoja. Näiden laitteiden läheisyydessä toimiessa tulee huomioida laitteiden liikkeet ja mahdolliset puristumisvaarat. Esimerkiksi polttoainekuljettimilla tai kattilan sisällä ei saa ikinä työskennellä yksin. Näissä tehtävissä tulee aina olla ns. luukkumies, joka tarvittaessa pystyy pysäyttämään mekaanisen laitteen, hälyttämään apua sekä auttamaan tarvittaessa mahdollisuuksien mukaan.

Kunnossapito- ja huoltotehtävissä työskennellessä sähkölaitteet kytketään pois päältä turvakytkimistä. Turvakytkin lukitaan erillisellä lukolla. Mikäli turvakytkin on lukittu, lukkoa ei saa poistaa kukaan muu kuin lukon asettanut henkilö. Tällä vältetään mahdollisimman hyvin laitteistojen käynnistyminen siten, että se voisi aiheuttaa vaaratilanteen laitteiston parissa työskentelevälle henkilölle.

## **6.2 Turvallisuusjärjestelmät**

Tuotantolaitosten turvallisuusjärjestelmät ovat hyvin pitkälle automatisoituja ja perustuvat erilaisiin lukituksiin ja käynnistysehtoihin. Mikäli laitteiston toiminta tai jonkin parametrin raja-arvo ylittyy voi tämä aiheuttaa lukituksen. Lukitusta ei saada poistettua ilman käyttäjän toimenpiteitä. Yleensä tämä vaatii käyttäjän poistamaan lukitus fyysisesti paikan päällä. Turvallisuusjärjestelmät liittyvät mekaanisiin laitteisiin tai automatiikkaan asetettuihin raja-arvoihin. Seuraavassa käsitellään tyypillisimmät lukitukset ja käynnistyksen estot kaukolämpölaitoksilla.



Kuva 14. Lukituskaavio

Kuvassa 14 esitetyn lukituskaavion toiminta perustuu käynnistyksen estoihin. Sekundaari-ilmapuhaltimen (SI, toisiopuhaltimen) saa käynnistää, mikäli hätäseis-painike ei ole painettu ja savukaasupuhallin on käynnissä. Primääri-ilmapuhaltimen käynnistys (PI, ensiöpuhallin) voidaan toteuttaa, mikäli sekundaaripuhallin on käynnissä, savukaasupuhallin on käynnissä ja sekundaari-ilman paine on suurempi kuin 5mbar. Lukituskaavio on toteutettu AND-piireillä, jossa jokaisen sisääntulon on annettava lupa, jotta AND-piirin ulostulosta saadaan lupa toteuttaa seuraava toimenpide. Painettaessa hätäseis-painiketta sisääntulo toisiopuhaltimen käynnistysluvalle poistuu ja puhallin sammuu. Tämä sammuttaa kaavion mukaisesti myös primääri-ilmapuhaltimen.

#### Virtauslukitus:

Virtauslukitus on ensimmäinen poistettava lukitus energiantuotantoa aloitettaessa. Kattilassa kiertävää veden virtausnopeutta mitataan esim. ultraäänianturilla ja tieto lähetetään automatiikalle. Mikäli veden virtaus kattilassa loppuu esim. putkirikon, vuoksi syntyy virtauslukitus. Virtauslukitus pysäyttää ja lukitsee kaikki tuotantolaitoksen laitteistot.

#### Alipainelukitus:

Kattilan tulipesän tulee olla alipaineinen verrattuna ympäristöön. Tämä alipaine tuotetaan savukaasupuhaltimella, ja sitä mitataan antureilla joko yhdestä tai useammasta tulipesän kohdasta. Alipaineen mittaustieto lähetetään automatiikalle, joka säätää tulipesän alipainetta savukaasupuhaltimen nopeuden mukaan. Mikäli tulipesä on ylipaineinen liian pitkän aikaa tai tulipesä

käy suurella ylipaineella, syntyy alipainelukitus. Alipainelukitus pysäyttää ja lukitsee kaikki muut laitteistot paitsi savukaasupuhaltimen.

Happilukitus:

Tuotantolaitoksen palamista ohjataan savukaasujen jäännöshapen avulla. Jäännöshapen mittausta ja säätö on prosessin ohjauksen yksi tärkeimmistä säätöparametreista. Suurilla laitoksilla jäännöshappi on asetettu arvoon 3,5-4,2 %. Jäännöshappi mitataan savukanavasta happianalysointilaitteella tai muulla hapen määrää mittaavalla laitteella. Jäännöshapetta säädetään toisio- eli sekundaaripuhaltimella.

Jäännöshapen pudotessa liian pieneksi tulee hälytys. Mikäli happi jatkaa putoamistaan lukitusrajan alapuolelle, syntyy happilukitus. Tämä lukitus sammuttaa ja lukitsee kaikki muut laitteet pois käytöstä paitsi savukaasupuhaltimen. Jäännöshappi on tärkeää pitää lähellä asetusta, jotta voidaan varmistaa tulipesässä olevan hapen määrä. Mikäli tulipesässä ei ole riittävästi happea mutta on paljon lämpöä ja palavia kaasuja se aiheuttaa räjähdysvaaran. Kun kuuma, kaasumainen aine jossain kohtaa sekoittuu hapen kanssa, seurauksena voi syntyä räjähdys.

Ylilämpölukitus:

Ylilämpölukitus on mekaaninen järjestelmä, joka suojaa painelaitteita ylilämmöltä. Yleisesti kaukolämmön tuotantolaitoksien veden suurin sallittu lämpötila on 120 °C. Ylilämpötermostaatti asetetaan tähän arvoon mekaanisesti. Lämpötilan noustessa yli 120 °C ylilämpötermostaatti laukeaa ja pysäyttää sekä lukitsee kaikki järjestelmät. Ylilämpötermostaatti voidaan ainoastaan käydä kuitaamassa fyysisesti paikan päällä. Ylilämpötermostaatti on kriittinen turvalaite, joka tulee olla kahdennettu eli niitä tulee olla toiminnassa kaksi kappaletta.

Polttoaineen syötöstä aiheutuvat lukitukset:

Tyypillisimmän polttoaineen syöttölukitus syntyy polttoaineen kuljettimilla. Näitä lukituksia aiheuttavat ruuhkat tai polttoaineen seassa olevat, sinne kulumattomat kohteet. Näitä voivat olla jäätyneet hakekasaumat tai liian suuret rangat, jotka ovat päässeet kulkeutumaan polttoaineen sekaan. Polttoaineen

syöttölukitus voidaan toteuttaa useammalla eri tavalla, mutta yleisimmin tämä on toteutettu pyörintävahdilla. Pyörintävahti seuraa akselissa tai hammaspyörässä olevaa haittalevyä ja varmistaa, että laite pyörii oikeasti. Mikäli laite ei ole pyörinyt tietyn ajan kuluessa tai pyöriminen on liian hidasta, tulee polttoaineen syötöstä aiheutuva lukitus. Tämä lukitus pysäyttää ensiöpuhaltimen ja sitä kautta polttoaineen syötön ja lukitsee nämä laitteistot.

### 6.3 Varolaitteet

Energiantuotantolaitoksien automatiikka huolehtii laitoksen turvallisuudesta. Tuotantolaitoksesta riippuen tarvitaan kuitenkin turvallisuuteen itsenäisiä laitteita ja järjestelmiä. Osa näistä ei ole riippuvainen ulkopuolisesta käyttövoimasta. Tärkeimmät varolaitteet ja järjestelmät ovat varasähköjärjestelmä, paineenalennusventtiilit, varoventtiilit.

Paineenalennusventtiili:

Paineenalennusventtiili toimii paineenalentimena vesipiirissä. Laite on mekaaninen, yleensä jousikuormitettu venttiili, joka avautuu paineen kasvaessa. Paineen alennusventtiili on ensimmäinen varolaitte, joka toimii paineen kasvaessa järjestelmässä liian suureksi. Paineen alennusventtiili päästää veden lisävesisäiliöön. Venttiili on kytketty pienempään putkeen ja paineen nousun ylittäessä putken purkukapasiteetin järjestelmän paine jatkaa nousuaan.

Varoventtiili:

Varoventtiili on laite, joka avautuu mekaanisesti paineen kasvaessa. Varoventtiili on tuotantolaitoksen tärkein ja viimeinen turvalaitte. Varoventtiilin kautta tuleva vesi tai höyry on ohjattava turvalliseen purkupaikkaan. Varoventtiilit huolletaankin säännöllisesti ja niiden toimivuus tulee myös koestaa kerran kuukaudessa. Varoventtiilien toiminta tarkastetaan säännöllisesti tarkastuslaitoksen tekemän määräaikaistarkastuksen yhteydessä.

Kuivakiehintasuoja:

Kuivakiehintasuoja on vesipiirin asennettu anturi, joka tunnistelee veden läsnäoloa. Mikäli putkiston veden pinta laskee, pääsee ilma kosketuksiin anturin kanssa, jolloin kuivakiehintasuoja laukeaa. Veden pinnan laskeminen paineisessa, ylikuumassa vedessä aiheuttaa putkistossa kiehua muodostaen sinne höyryä ja ilmaa tai näiden seoksen. Höyry/ilma aiheuttaa laitteistoihin, etenkin pumppuihin, veden kanssa paineiskuja, jotka rikkovat laitteistoja. Höyry/ilma aiheuttaa vesipiirissä kavitaatiota. Höyry/ilma voi myös jäädä ”jumiin” kiertovesi pumppujen siivistöihin, jolloin pumppu ei enää pumppaa vettä ja veden kierto loppuu. Kuivakiehintasuojan laukeaminen aiheuttaa myös lukituksen, joka pysäyttää ja sammuttaa kaikki järjestelmät.

#### **6.4 Varajärjestelmät**

Energiantuotantolaitoksissa on olemassa varajärjestelmiä, joilla voidaan varmistaa laitteiston turvallinen toiminta häiriötilanteissa. Varajärjestelmänä toimii yleensä generaattori, joka saa käyttövoimansa yleensä kevyestä polttoöljystä. Generaattorilla tuotetaan sähköä kriittisiin laitteisiin, jotta toiminta voidaan saattaa turvalliseen tilaan. Veden kiertoa voidaan tehdä myös polttomoottorikäyttöisillä pumpuilla, joilla varmistetaan veden kierto tuotantolaitoksessa.

#### **6.5 Lainsäädäntö**

Energiantuotantolaitoksen turvallisuutta ohjaa painelaitelaki 1144/16. Energian tuotannossa käytettävät laitteistot ovat painelaitteita, kuten kattilat, putkisto, säiliöt jne. Painelaitelakia on tarkennettu valtioneuvoston asetuksella

painelaitteista 1548/16, yksinkertaisista painesäiliöistä 1550/2016, painelaiteturvallisuudesta 1549/16 sekä asetuksella kattilalaitoksen käytönvalvojen pätevyyskirjoista 891/99. Lainsäädännön mukaan painelaite on rakennettava, sijoitettava, käytettävä, hoidettava ja tarkastettava siten, ettei se vaaranna kenenkään terveyttä, turvallisuutta tai omaisuutta. Lain rekisteröidyksi painelaitteiksi määrätyille painelaitteille on tehtävä tarkastuksia. Näitä tarkastuksia tekevät tarkastuslaitokset. Lain valvovana viranomaisena toimii turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes 2021).

Kattilalaitoksille on myös määrättävä käytönvalvoja, joka vastaa painelaitteiden turvallisesta käytöstä. Käytönvalvojalla tulee olla taulukossa 6 mainittu, asetuksen 891/99 mukainen pätevyys.

Taulukko 6. Käytönvalvojan pätevyyskirjat (Asetus kattilalaitoksen käytönvalvojen pätevyyskirjoista 891/99)

Pätevyyskirjojen paine- ja teholumurajat		
	Käyttöpaine, bar	Teholuku, bar x MW
B-koneenhoitaja	≤ 16	40
A-koneenhoitaja	≤ 25	100
Alikonemestari	≤ 40	500
Konemestari	x	≤ 5000
Ylikonemestari	x	> 5000



Käytönvalvojan pätevyyskirjoihin on olemassa poikkeuksia. ”Insinööri tai diplomi-insinööri, jolla on tutkinnossa kattilalaitoksiin liittyviä opintosuorituksia ja työkokemusta kattilalaitosten käytöstä ja kunnossapidosta, ei tarvitse pätevyyskirjaa toimiakseen kattilalaitoksen käytönvalvojana” (Tukes 2021)

## 7. Kannattavuuslaskenta

### 7.1 Nykyarvomenetelmä

Nykyarvomenetelmällä lasketaan tulevaisuudessa saatavan rahan arvoa nykyhetkellä. Menetelmässä on tarkasteltava ajanjakso, jolloin tulee tuloa, jonka arvo lasketaan vastaamaan nykyhetkeä. Tulevaisuudessa saatava raha ei ole niin arvokasta kuin jos se olisi käytössä nyt. Tulevaisuudessa saatavien tuottojen ja kustannusten laskeminen nykyarvoon toteutetaan diskonttaamalla ne nykyhetkeen. (Netto)Nykyarvomenetelmä on suosittu tapa laskea investointien kannattavuutta teoreettisesti. Tuoton ollessa yhtä suuri jokaisella jaksolla nykyarvo lasketaan kaavalla 6. Nettonykyarvo = tulevien tuottojen nykyarvo – alkuinvestoinnin arvo. (Jormakka, Koivusalo, Niskanen & Nikander 2015, 14.)

$$NPV = a_{n/i} \times S_t + \frac{JA}{(1+i)^n} - H \quad [10]$$

jossa	NPV	on nettonykyarvo
	$S_t$	on tuotto
	H	on alkuinvestoinnin arvo
	JA	on investoinnin jäännösarvo
	n	on investoinnin pitoaika, a
	i	on korko

$$a_{n/i} = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad \text{on nykyarvotekijä}$$

## 7.2 Takaisinmaksumenetelmä

Takaisinmaksumenetelmässä lasketaan aika vuosina, jolloin investointi on maksanut itsensä tuottoina takaisin. Takaisinmaksumenetelmässä arvioidaan investoinnin kannattavuutta ajan suhteen, maksaako investointi itsensä takaisin riittävän nopeasti. Investoinnille tulisi myös saada tuottoa ennen kohteen käyttöön päättymistä. Takaisinmaksuajan ollessa liian pitkä investoinnista aiheutuu kuluja eikä siitä saada tuottoa. Lyhyellä takaisinmaksuajalla investoinnille jää aikaa ennen käyttöön päättymistä tuoda investoijalle tuottoa. Takaisinmaksuaika lasketaan kaavalla 7. (Tevä-Helminen 2013, 22.)

$$\sum_{t=1}^{n^*} \frac{S_t}{(1+i)^t} - H = 0 \quad [11]$$

jossa  $n^*$  on takaisinmaksuaika

## 7.3 Annuiteettimenetelmä

Annuiteettimenetelmässä perusinvestointi jaetaan pitoaikaa vastaaviksi, yhtä suuriksi pääomakustannuksiksi. Tätä pääomakustannusta kutsutaan annuiteetiksi, joka on vakio. Investointi on kannattava annuiteetin ollessa pienempi, kuin investoinnista saatava vuotuinen nettotuotto. Annuiteettitekijä on diskonttaustekijän käänteisluku. Annuiteettimenetelmässä jaksollisten maksujen nykyarvolaskennassa menetellään päivävästoin kuin nykyarvomenetelmässä. Annuiteetti lasketaan kaavan 8 mukaan. (Tevä-Helminen 2013, 17)

$$\text{Annuiteetti} = c_{n/i} \times \left( H - \frac{JA}{(1+i)^n} \right) \quad [12]$$

jossa  $c_{n/i}$  annuiteettitekijä, lasketaan kaavan 9 mukaan

$$c_{n/i} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad [13]$$

## 7.4 Likimääräinen annuiteettimenetelmä

Likimääräisessä annuiteettimenetelmässä summataan poistot ja korkokustannukset. Likimääräisessä annuiteettimenetelmässä ei lasketa korkoa korolle. Korko lasketaan hankintahinnan ja jäännösarvon keskiarvona. Investointi on kannattava likimääräisen annuiteetin ollessa pienempi kuin vuosittaiset nettotuotot. Likimääräinen annuiteetti lasketaan kaavalla 10. Likimääräisessä annuiteettimenetelmässä käytetään myös tasapoistoa eikä annuiteettipoistoa. (Tevä-Helminen 2013, 18.)

$$LAN = \frac{H-JA}{n} + \frac{i(H+JA)}{2} \quad [14]$$

jossa  $LAN$  on likimääräinen annuiteetti

## 8. Tuotantolaitoksen mitoitus

### 8.1 Työn tavoitteet ja menetelmät

Tämän työn tavoitteena on esisuunnitella ja mitoittaa energian tuotantolaitos, joka toimii monialaisena oppimisympäristönä eri oppimisaloilla. Mitoituksen perusteella tehdään kannattavuuslaskenta taloudellisesta näkökulmasta.

Tuotantolaitoksen esisuunnittelussa on selvitetty erilaisia tekniikoita, miten tämä tuotantolaitos toteutetaan, sekä minkälainen oppimisympäristö on.

Tuotantolaitoksen rakentamisen ja polttoaineen kustannukset on saatu tarjouspyynnöin laitetoimittajilta sekä neuvotteluissa asiantuntijoiden kanssa.

Tekniikkojen selvityksessä on myös pohdittu tulevaisuuden näkymiä – millaista energian tuotanto on tulevaisuudessa.

Esisuunnittelussa on käyty paljon keskusteluja eri alojen asiantuntijoiden, opettajien sekä toimialapäälliköiden kanssa. Mitoituksen perustietoja kuten toteutuneen energian kulutuksen sekä sijaintiin liittyviä asioita on käsitelty REDUn kiinteistöpalvelujen asiantuntijoiden kanssa. Mitoituksen lähtötiedot kerätään toteutuneen kulutuksen mittauksien perusteella sekä haastattelemalla REDUn eri asiantuntijoita. Kannattavuustarkastelu tehdään nykyarvomenetelmällä sekä toteutetaan herkkyyshanalyysi.

Energiantuotantolaitoksen sijoituspaikka on Lapin koulutuskeskus REDUn Jänkätien toimintayksikön läheisyydessä.



Kuva 15, REDU, Jänkätien toimintayksikkö, Opetuslämpökeskus

Mitoituksen lähtötietoina käytetään Jänkätien toimintayksikön toteutuneita kulutustietoja. Tuleva tuotantolaitos kattaisi suurimman osan Lapin koulutuskeskus REDUn Jänkätien toimintayksikön lämmityksen ja lämpimän käyttöveden energiankulutuksesta.

## 8.2 Oppimisympäristön käyttö

Jänkätien toimintayksikössä oppimisympäristönä toimii tällä hetkellä vuonna 1987 rakennettu opetuslämpökeskus. Opetuslämpökeskuksessa on kaksi kiinteän polttoaineen (KPA) kattilaa, joiden polttoaineteho on á 1,1 MW eli yhteensä 2,2 MW. Lisäksi opetuslämpökeskuksessa on 850 kW tulitorvituliputkikattila, joka toimii kevyellä polttoöljyllä.

Tässä työssä käytettävä sijoituspaikka olisi olemassa oleva opetuslämpökeskus, kuvassa 15 punaisella numerolla 1. Vaihtoehtoinen, uusi sijoituspaikka on merkitty kuvaan 15 numerolla 2. Molemmissa tapauksissa oppimisympäristölle rakennetaan uudet tilat n. 300 m<sup>2</sup>. Tässä mitoituksessa on valittu tuotantotavaksi puun kaasutustekniikka, ja puukaasun tuotantolaitosta käytetään lämmöntuotantoon.

Laitteistovalinnassa tuotekaasulle on mietitty myös muuta mahdollista käyttöä. Mikäli puukaasua halutaan jalostaa jollain tietyllä tekniikalla asettaa se myös kaasuttimelle rajoituksia. Tämän rajoitteen ja mahdollisen muun toiminnan rakentaminen oppimisympäristöön rajoittaa kaasutukseen valittavaa tuotantotekniikkaa.

Uusi tuotantolaitos uudistaisi koko energia-alan koulutuksen ja siihen liittyvien muiden alojen koulutuksien oppimisympäristön. Oppimisympäristöä voisivat hyödyntää mm. seuraavat alat: metsä, logistiikka, talotekniikka, LVI, kunnossapito, sähkö ja metalli. Oppimisympäristön käytöstä vastaisivat opiskelijat, opettajan ohjauksessa ja valvonnassa.

### **8.3 Mitoitus**

Kiinteää polttoainetta käyttävän tuotantolaitoksen mitoituksen peruseriaate on, että laitoksen huipputeholla tuotetaan 90 % tarvittavasta energiamäärästä ja huipputeho mitoitetaan 40 – 60 % maksimitehontarpeesta. Kiinteän polttoaineen laitosten käyttö pienillä tehoilla kesäkuukausina on erittäin vaikeaa. Pienellä teholla ajettaessa takatulen vaara kasvaa ja tulipesän lämmöt ovat pieniä, jolloin kattila nokeentuu erittäin helposti ja sen hyötysuhde putoaa merkittävästi. (Lankinen, Hirvonen, Huttunen & Käyhkö 2013, 59-60.)

Koska lämmöntuotantoa ei mitoiteta huipputehon tarpeen mukaan, tarvitaan muita lämmönlähteitä. Kiinteän polttoaineen tuotantolaitokseen rakennetaan yleensä varajärjestelmä. Tällä hetkellä varajärjestelmä on kevyttä polttoöljyä (POK) käyttävä kattila. POK-kattila on investointikustannuksiltaan pieni, mutta käyttökustannuksiltaan täysin riippuvainen kevyen polttoöljyn hinnasta. Kevyen polttoöljyn hinta vaihtelee 100 €/MWh molemmin puolin riippuen sen hetkisestä öljyn hinnasta. Kiinteän polttoaineen (hake) hinta on tällä hetkellä 22 € / MWh. (Tilastokeskus 2021)

Tällä hetkellä Jänkätien toimintayksikkö on yhdistetty Rovaniemen kaukolämpöverkkoon. Tässä tapauksessa olemassa oleva kaukolämpöliittymä ja kaukolämpökeskus jää lämmöntuotannon varajärjestelmäksi eikä tuotantolaitokseen investoida varajärjestelmää. Tämä vaikuttaa tuotantolaitoksen investoinnin kannattavuuden arviointiin. Polttoaineen tuotannossa käytetään myös markkinahintaa alempaa hintaa koska oppilaitos pystyy tuottamaan polttoaineen itse opetuksen yhteydessä. (Lankinen ym. 2013, 58-59.)

Tuotantolaitoksen investointiin voi saada investointitukea 40 %, kun hanke sisältää uutta teknologiaa. Tuki haetaan Business Finlandilta.

#### **8.4 Mitoituksen lähtötiedot**

Jänkätien toimintayksikön (JT) pinta-ala  $A_{jt} = 12640 \text{ m}^2$ .

JT:n rakennustilavuus  $V_{jt} = 69890 \text{ m}^3$ .

JT:n lämmönkulutus MWh / kuukausi vuosina 2018 – 2020, mukaan lukien lämmin käyttövesi, on kuvattu alla olevassa taulukossa 7.

Taulukko 7. Jänkätien toimintayksikön toteutunut lämmönkulutus MWh

	2018	2019	2020	kulutuksen
Tammikuu	316	388	305	336
Helmikuu	325	323	271	306
Maaliskuu	299	260	252	270
Huhtikuu	149	166	166	160
Toukokuu	59	104	101	88
Kesäkuu	41	35	21	32
Heinäkuu	14	32	26	24
Elokuu	38	38	40	39
Syyskuu	93	91	92	92
Lokakuu	186	207	162	185
Marraskuu	215	309	247	257
Joulukuu	308	236	262	269

Lämmitykseen tarvittavan energian määrä vaihtelee eri vuosina. Eri vuosien kulutusta voidaan verrata lämmitystarvelukujen perusteella. Rovaniemen lämmitystarveluvut saadaan jakamalla lähimmän vertailupaikkakunnan, joka Rovaniemellä on Sodankylä, lämmitystarveluvut Rovaniemen kuntakertoimella  $K1 = 1,06$ . Alla olevassa taulukossa 8 on lähinnä Rovaniemeä olevan vertailupaikan, Sodankylän, lämmitystarveluvut. Taulukossa 9 on esitetty Rovaniemen lämmitystarveluvut. (Ilmatieteenlaitos 2021.)

Taulukko 8. Sodankylän lämmitystarveluvut, °Cvrk

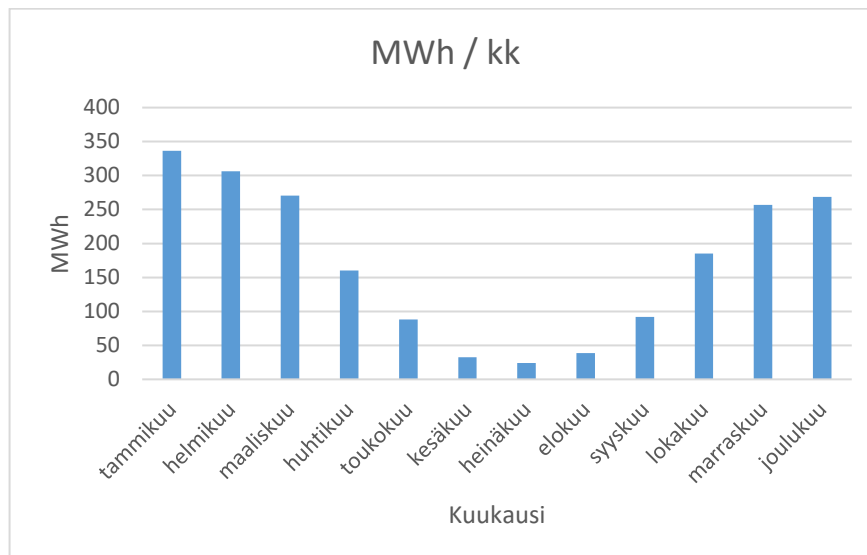
	2018	2019	2020
tammikuu	890	1047	820
helmikuu	893	805	750
maaliskuu	849	749	702
huhtikuu	504	460	565
toukokuu	151	344	347
kesäkuu	110	81	0
heinäkuu	0	127	35
elokuu	89	108	85
syyskuu	272	278	271
lokakuu	540	603	447
marraskuu	533	765	542
joulukuu	789	700	689
vuosi	5620	6067	5253



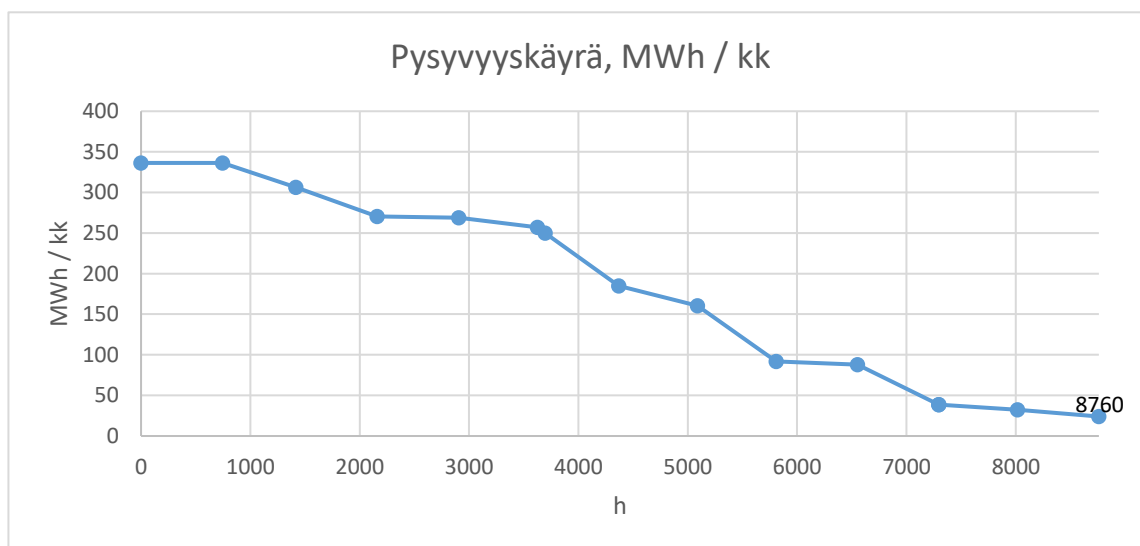
Taulukko 9. Rovaniemen lämmitystarveluvut, °Cvrk

	2018	2019	2020
tammikuu	840	988	774
helmikuu	842	759	708
maaliskuu	801	707	662
huhtikuu	475	434	533
toukokuu	142	325	327
kesäkuu	104	76	0
heinäkuu	0	120	33
elokuu	84	102	80
syyskuu	257	262	256
lokakuu	509	569	422
marraskuu	503	722	511
joulukuu	744	660	650
vuosi	5302	5724	4956

Taulukkojen 7 ja 9 suhteesta voidaan päätellä, että kulutus seuraa hyvin lämmitystarvelukuja. Suuren poikkeuksen tähän tekee vuoden 2020 huhtikuu, jolloin koronapandemian vuoksi oltiin siirrytty toimintayksiköstä kokonaan etäopetukseen. Kulutuksessa on kuitenkin huomattava, että rakennus käytti vuonna 2020 huhtikuussa yhtä paljon energiaa kuin edellisenä vuonna, vaikka lämmitystarveluku on vuonna 2020 huomattavasti suurempi eikä toimipisteessä ollut käytännössä lainkaan toimintaa.



Kuvio 1. Jänkätien toimintayksikön lämmönkulutus kuukausittain, keskiarvo 2018-2020



Kuvio 2. Jänkätien toimintayksikön lämmöntarpeen pysyvyyskäyrä

## 8.5 Mitoitus

Jänkätien toimintayksikön lämpötehotarve määritetään toteutuneen lämmönkulutuksen mukaan. Tässä lämmönkulutuksessa on mukana myös lämmin käyttövesi. Huipputehon mitoitus tehdään todelliseen kulutukseen

perustuen. Taulukon 6 mukaan Jänkätien toimintayksikön huippukulutuksen keskiarvo tammikuussa  $Q_{tam}$  vuosina 2018 – 2020 on 336 MWh.

Huipputehontarve määritetään kaavan 11 mukaan. Yhdessä vuorokaudessa on 24 h.

$$P_{jt,tam} = Q_{tam} \div (31d \times 24h) \quad [15]$$

jossa  $P_{jt,tam}$  on tammikuun huipputehontarve, MW

$Q_{tam}$  on tammikuun toteutunut lämmönkulutus, MWh

Sijoittamalla arvot kaavaan 11 saadaan  $P_{jt,tam} = 336MWh \div (31d \times 24h) = 0,4516 MW \approx 450 kW$ .

Koulurakennuksen kulutusprofiili painottuu arkipäiviin, koska rakennuksessa ei ole toimintaa viikonloppuisin. Toimipisteessä oleva ravintola on myös suljettu viikonloppuisin. Tämän perusteella huipputeho määritetään tammikuussa olevien arkipäivien mukaan. Tammikuissa ajanjaksolla 2018 – 2020 on 23 arkipäivää.

$$P_{jt,pain} = Q_{tam} \div (23d \times 24h) \quad [16]$$

Sijoittamalla kaavaan 12 arvot saadaan  $P_{jt,pain} = 336 MWh \div (23d \times 24h) = 0,6087 MW \approx 610 kW$ .

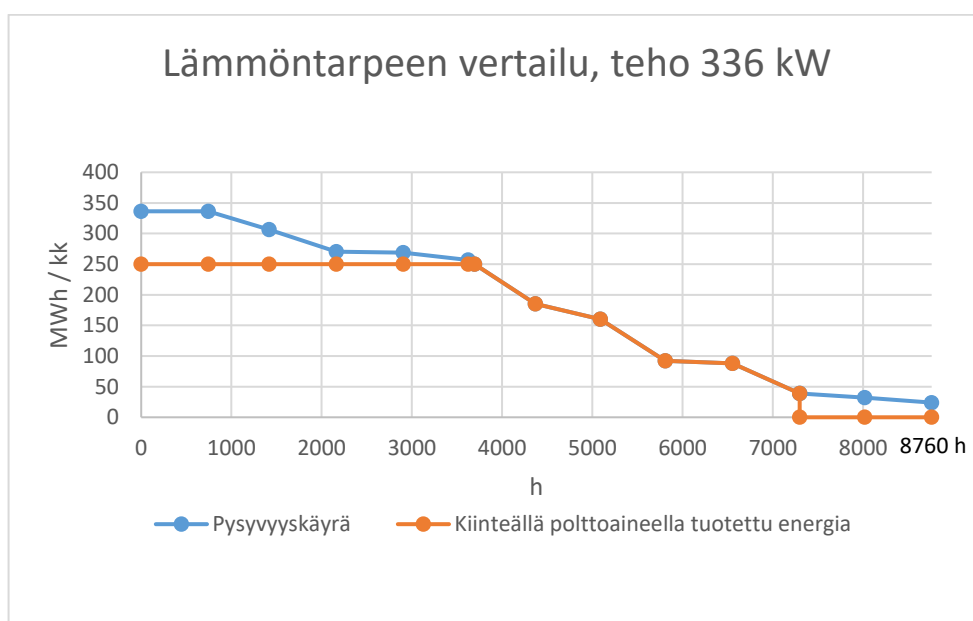
Lämmöntarpeen pysyvyyssäyrän mukaan teho mitoitetaan lokakuun kulutuksen mukaan. Lokakuun lämmöntarpeen keskiarvo vuosina 2018 - 2020 on 185 MWh. Tämä lämmöntarve on  $185 / 336 \times 100 \% = 55,1 \%$  lämmöntarpeen huipusta. Tällöin tuotantolaitoksen arkipäivillä **painotetuksi** lämpötehoksi

saadaan  $P_p = 610 \text{ kW} \times 0,551 = 336,1 \text{ kW}$ . Mitoitustehon valinta 55,1 % on kuitenkin suositellun 40 – 60 %:n sisällä maksimitehon tarpeesta.

Vertailuarvona lasketaan **ei painoitettu** lämpöteho.  $P_{ep} = 450 \text{ kW} \times 0,551 = 248 \text{ kW}$ .

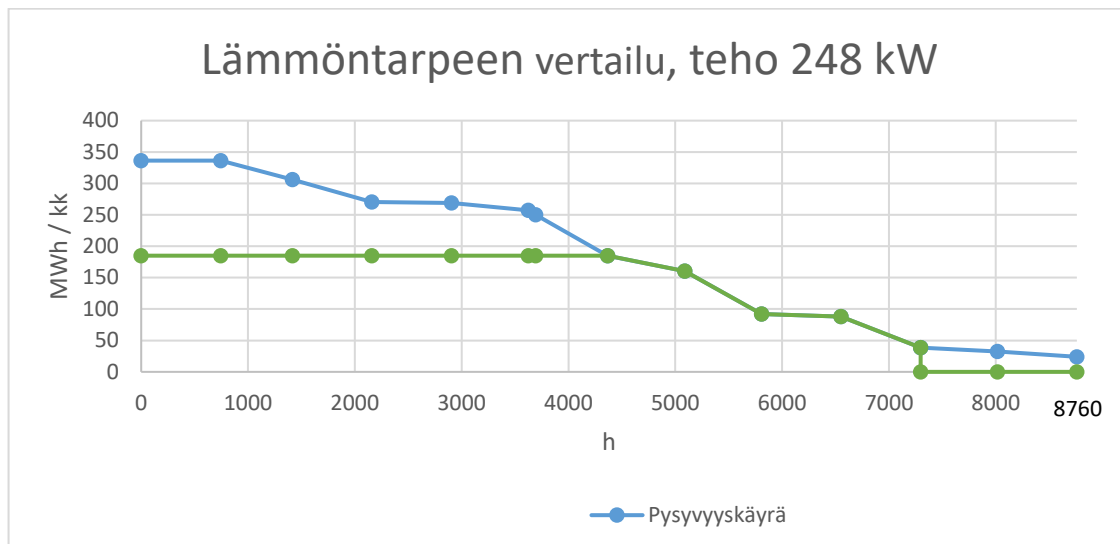
Kattila tulee hieman ylimitoitetuksi, mutta talvipäivien kulutusta saadaan kompensoitua huomattavasti verrattuna normaaliin mitoitukseen.

Huipunkäyttöaika on kaavion mukaan n. 3800 h. ”Tavallisesti kaukolämmön huipunkäyttöaika on n. 3200 h/a”. (Energiateollisuus, 2006, Energiateollisuus, s. 42)



Kuvio 3. Lämmöntarpeen vertailu

Kuvion 3 pysyvyyskäyrän mukaan arkipäivillä painotetulla mitoitusteholla 55,1 % saadaan tuotettua tarvittavasta energiamäärästä huomattavasti suurempi osa. Painoitetulla mitoitusteholla 336 kW saadaan tuotettua energiaa **250 MWh / kk**. Kokonaisenergiasta saadaan tuotettua tällä mitoituksella, kaavion 3 mukaan pinta-alojen suhteella 88,1 % kokonaisenergian tarpeesta eli 88,1 % x 2059 MWh = **1814 MWh**.



Kuvio 4. Lämmöntarpeen vertailu, suora mitoitusteho, 248 kW

Ei painoitettussa mitoituksessa kiinteällä polttoaineella saadaan 248 kW tuotantoteholla tuotettua energiaa 184 MWh / kk. Kokonaisenergiasta saadaan tuotettua tällä mitoituksella kuvion 4 mukaan pinta-alojen suhteella 68 % kokonaisenergian tarpeesta eli  $68 \% \times 2059 \text{ MWh} = \mathbf{1400 \text{ MWh}}$ .

Tuotetun energiamäärän ero on merkittävä. Tuotantotehoksi valitaan painoitettun mitoituksen mukaan 336 kW. Valitulla laitteiston toimittajalla on tuotekaasun jalostamiseen soveltuvat laitteistot, jotka ovat helposti integroitavissa toisiinsa, mikäli jalostuslaitteisto joskus tullaan investoimaan. Tuotannollisia käyttötunteja tuotantolaitokselle tulee vuodessa **4796 h / a**. Henkilöstökustannukset on katettu kohdassa oppimisympäristön arvo. Vuosittaiset huoltokustannukset ovat laitetoimittajan mukaan **10 000 €**. Nämä huoltokustannukset katetaan energiantuotannosta saavutetulla säästöllä verrattuna nykyiseen lämmitykseen.

Valitulla kaasutuslaitteistolla saadaan tuotettua kaasua 80 % polttoaineesta. Lämpöä voidaan myös ottaa prosessista hyötykäyttöön, jolloin hyötysuhteeksi tulee 0,85. Kaasukäyttöisen kattilan hyötysuhde polttimiseen on 90 % mikä on hyvä hyötysuhde.

Tässä laskelmassa käytetään hakkeen hintaa **18,50 € / MWh** toimitettuna laitokselle. Tämä hinta on laskettu yhdessä metsäalan opettajien kanssa, mikäli tarvittava hake tuotetaan opetuksen yhteydessä.

Tuotetun energian hinta saadaan laskettua seuraavasti: hakkeen hinta x hyötysuhde kaasuksi x lämmöntuotannon hyötysuhde + käyttökustannukset. Tällöin tuotetun energian hinnaksi saadaan  $1814 \text{ MWh} \times 18,50 \text{ € / MWh} / 0,85 / 0,9 + 10000 \text{ € / a} = \mathbf{53868 \text{ €}}$ . Sama energia maksaa kaukolämpönä  $46,64 \text{ € / MWh} \times 1814 \text{ MWh} = \mathbf{84604 \text{ €}}$ . Lämmityksen osalta tuotoksi saadaan  $84224 \text{ €} - 53867 \text{ €} = \mathbf{30737 \text{ € / a}}$ . Laitteistojen hyötysuhteet on saatu mahdollisilta laitetoimittajilta.

Koska kyseessä on oppimisympäristö, on sillä olemassa myös muuta arvoa, joka lasketaan mukaan vuosituloon. REDU:n investoinnista ja oppimisympäristöstä vastaavan toimialapäällikön mukaan tällaisen oppimisympäristön vuotuinen arvo on  $74960 \text{ € / a}$ . Tähän arvioon on päästy vuotuisen valtionavustuksen ollessa  $14\,000 \text{ € / opiskelija}$ , josta kuluihin menee 45 %. Oppimisympäristöä käyttää vuodessa 10 opiskelijaa 50 viikon ajan, josta saadaan  $500 \text{ opiskelijaa/viikko} = 9,7 \text{ opiskelijaa / a}$ . Oppimisympäristön tuottama rahallinen lisäarvo on  $14\,000 \text{ €} \times 0,55 \times 9,7 / a = \mathbf{74960 \text{ € / a}}$ . Tällöin vuosittaiseksi kokonaistuotoksi tulee  $30737 \text{ € / a} + 74960 \text{ € / a} = \mathbf{105\,697 \text{ € / a}}$ . Oppimisympäristön arvona voitaisiin pitää huomattavasti korkeampaakin lukua, mikäli koko polttoaineentuotanto ja logistiikkaketju arvioidaan tähän mukaan.

Energiantuotantolaitosten käyttöikä vaihtelee 25 ja 35 vuoden välillä. Tässä laskelmassa käytetään investoinnin pitoaikana  $n = 25$  vuotta. Mikäli laitteisto asennetaan olemassa olevaan opetuslämpökeskukseen, alkuinvestointi pienenee. Teollisuushallin rakentamisen kustannusarvio on  $\mathbf{1250 \text{ € / m}^2}$ . Tähän arvioon on päästy yhdessä REDU:n kiinteistöpalvelujen asiantuntijoiden kanssa.  $300 \text{ m}^2$  rakennuksen rakentaminen maksaisi täten  $1250 \text{ € / m}^2 \times 300 \text{ m}^2 = \mathbf{375\,000 \text{ €}}$ . Rakennuksen jäännösarvona voidaan pitää asiantuntijan arvion mukaan n. **50 %** rakennuskustannuksista. Tällöin rakennukselle jää

jäännösarvona **187 500 €**. Tämä arvio on tehty varovaisuutta noudattaen ja sijainnin perusteella jäännösarvo tulee olemaan huomattavasti suurempi. Jäännösarvosta on tehty myös vertailu, jossa erään alueella myynnissä olevan, vuonna 1983 rakennetun tuotantotilan myyntihinta on 1 370 000 €. Rakennuksen pinta-ala on 1800 m<sup>2</sup>, joten neliöhinnaksi saadaan 1 370 000 € / 1800 m<sup>2</sup> = 731 € / m<sup>2</sup>.

Uutta kattilaa ei tarvitse investoida. Tuotantolaitokseen otetaan käyttöön jo olemassa oleva, erittäin vähällä käytöllä ollut hyväkuntoinen tulitorvi-tuliputkikattila. Tähän kattilaan asennetaan öljypolttimen tilalle tuotekaasun polttamiseen soveltuva polttin. Tähän käyttöön soveltuvan polttimen hinta erään tarjouksen mukaan on **45 000 €**. Erään tarjouksen mukaan kaasutinlaitteiston kustannus asennettuna, investointi tuen ollessa 40 % on **241 000 €**. Alkuinvestoinnin H arvoksi saadaan täten 375 000 € + 45 000 € + 241 000 € + 10 000 = **661 000 €**. Laitteiston purkamisesta aiheutuvat kustannukset saadaan katettua myymällä vanha laitteisto.

Investoinnin korko ei ole kovin suuri, koska investoinnin riskit ovat suhteellisen pienet. Riskiä vähentää merkittävästi se, että tarkoitus ei ole tehdä tuotantolaitoksella voittoa vaan toimia oppimisympäristönä. Lisäksi oppilaitoksen toiminta ei vaarannu, mikäli tuotantolaitos ei olisi toiminnassa vaan toimisi muunlaisena oppimisympäristönä, esim. kunnossapidossa. Tämän vuoksi käytetään korkona **5 %**. Kaikki hinnat on ilmoitettu **alv. 0 %**.

## 8.6 Investoinnin kannattavuus

Investoinnin kannattavuus lasketaan nykyarvomenetelmällä. Päädyin kannattavuuslaskelmassa nykyarvomenetelmään sillä perusteella, että yleisen mielipiteen mukaan nykyarvomenetelmä on paras tapa toteuttaa investointien kannattavuuslaskelmia teoreettisesti tarkasteltuna. (Jormakka ym. 2015, s. 234)

Taulukko 10. Investoinnin lähtötiedot

<b>Investointi</b>			
Rakennus		375000	€
Poltin		45000	€
Kaasutuslaitteisto		241 000	€
yhteensä		661000	€
<b>Mitoitustiedot</b>			
Energian tarve		2059	MWh
Mitoitus 1, teho 336 kW		1 814	MWh
Mitoitus 2, teho 248 kW		1 400	MWh
Teho 1		336	kW
Teho 2		248	kW
Hake hinta		18,50	€
kaasutus, Fii		0,85	
Poltto, Fii		0,9	
Kl-hinta		46,64	€/MWh
Jäännösarvo		50%	

Taulukko 11. Tuotot ja kustannukset

<b>VUOSITUOTOT</b>		<b>Kustannukset:</b> vuosi	
opp.ymp.arvo	74 960 €	polttoaine	43 867,47 €
lämpö	84 603,98 €	huolto	10 000 €
tuotot yhteensä	159 563,98 €	kustannukset yhteensä	53 867,47 €
nettotuotto	105 696,51 € / a		



Sijoitetaan arvot kaavaan 6, jolloin investoinnin nykyarvoksi saadaan **NPV = 884 057 €**. Nykyarvo on erittäin paljon plusmerkkinen, joten investointi on erittäin kannattava. Jäännösarvolla ei ole suurta merkitystä investoinnin kannattavuuteen. Jäännösarvon ollessa **0 €**, saadaan **NPV = 828 687 €**. **Mitoitusteholla 2, NPV = 725 023 €**. Investointi on myös kannattava pienemmällä mitoitusteholla.

## 8.7 Herkkyysanalyysi

Herkkyysanalyysillä tarkastellaan eri muuttujien vaikutusta investoinnin nykyarvoon ja tätä kautta investoinnin kannattavuuteen. Herkkyysanalyysi toteutetaan yhden muuttujan muuttuessa alkuperäiseen investointiin. Lisäksi herkkyysanalyysissä toteutetaan pahin mahdollinen skenaario. Muuttujina käytetään hakkeen hintaa, oppimisympäristön arvoa ja tuotantotuntien määrää.

Hakkeen hinta nousee:

Tässä skenaariossa oletetaan, että haketta ei voida tuottaa markkinahintaa edullisemmin. Lisäksi oletetaan, että ostopuun hinta nousee. Käytetään hakkeen hintana 24 € / MWh.

Taulukko 12. Lähtötiedot, korkeampi hakkeen hinta

Investointi			
Rakennus		375000	€
Poltin		45000	€
Kaasutuslaitteisto		241 000	€
yhteensä		661000	€
Energian tarve		2059	MWh
Mitoitus 1, teho 336 kW		1 814	MWh
Teho 1		336	kW
Hake hinta		24,00	€
kaasutus, Fii		0,85	
Poltto, Fii		0,9	
KI-hinta		46,64	€/MWh
Jäännösarvo		50 %	

Hakkeen hinnan noustessa 24 € / MWh saadaan nykyarvoksi **700 246 €**.

Investointi on erittäin kannattava myös kalliimmalla hakkeen hinnalla

Oppimisympäristön arvo laskee:

Tässä skenaariossa oppimisympäristön arvo laskee oppilasmäärän tyrehtyessä, jolloin oppimisympäristön käyttöaste ei ole niin suuri. Tässä tapauksessa 10 oppilasta käyttää oppimisympäristöä vain 10 viikkoa vuodessa 50 viikon sijaan. Oppimisympäristön arvo on pudonnut viidesosan eli arvona pidetään 14992 € / a peruslaskennassa käytetyn 74960 € / a sijaan.

Taulukko 13. Lähtötiedot, oppimisympäristön arvo laskee

VUOSITUOTOT		Kustannukset: vuosi	
opp.ymp.arvo	14 992 €	hake	43 867,47 €
lämpö	84 603,98 €	huolto	10 000 €
Tuotot yhteensä	99 595,98 €	kustannukset yhteensä	53 867,47 €
nettotuotto	45 728,51 €	/a	

Oppimisympäristön arvon laskiessa 14992 € /a saadaan nykyarvoksi **38 871 €**.  
Investointi on kannattava myös kalliimmalla hakkeen hinnalla.

Tuotantotuntien määrä laskee:

Tässä skenaariossa tuotantotuntien määrä laskee merkittävästi, joten lämmöntuotannon osuus laskee.

Taulukko 14. Lähtötiedot. Tuotantotuntien määrä laskee

Investointi			
Rakennus		375000	€
Poltin		45000	€
Kaasutuslaitteisto		241 000	€
yhteensä		661000	€
Energian tarve		2059	MWh
Mitoitus 1, teho 336 kW		1 192	MWh
Teho 1		336	kW
Hake hinta		18,50	€
kaasutus, Fii		0,85	
Poltto, Fii		0,9	
KI-hinta		46,64	€/MWh
Jäännösarvo		50 %	

Tuotantotuntien määrän lasku oletetaan johtuvan jostain muusta syytä kuin laiterikosta. Oletetaan tuotantotuntimäärä putoavan 2500 h / a, jolloin tuotantotuntien määrä vuodessa on 4796 h / a alkuperäisen 7296 h / a sijaan. Tällä tuotantotuntimäärällä saadaan tuotettua 1192 MWh vuodessa. Tarkastelussa ei oteta huomioon tuotantotuntien sijoittumista vuoden ajan mukaan. Tuotantotuntien ollessa 4796 h /a, saadaan nykyarvoksi **687 189 €**. Investointi on erittäin kannattava myös tuotantotuntien vähentyessä.

Nollaraja laskenta:

Nollaraja laskennassa tarkastellaan millä tuotolla investoinnin nykyarvo on 0 €. Vuosittaisten tuottojen ollessa **42 975 €** saadaan nykyarvoksi hieman positiivinen, 57 €. Tätä vuosittaista tuottoa voidaan pitää nollarajana. Mitä suuremmat tuotot ovat, sitä kannattavampi investointi on.

Pahin mahdollinen skenaario:

Pahimmassa mahdollisessa skenaariossa toteutetaan kaikkien em. muuttujien vaikutus investoinnin kannattavuuteen. Investoinnin kannattavuuteen vaikuttavat alla esitetyt taulukon mukaiset muutokset.

Taulukko 15. Lähtötiedot, pahin mahdollinen skenaario

	alkuperäinen arvo	muuttunut arvo
Tuotantotunnit	7296 h	4796 h
Hake hinta	18,50 €	24,00 €
opp.ymp.arvo	74 960 €	14 992 €

Pahimmassa mahdollisessa skenaariossa saadaan investoinnin nykyarvoksi **-278 781 €**. Tästä voidaan todeta, että investointi ei ole kannattava investoinnin nykyarvon ollessa negatiivinen.

Yhteenveto:

Investoinnin kannattavuuden yhteenvetona voidaan todeta, että investointi on kannattava herkkyyksanalyysissä todetuilla muuttujilla. Investointi ei kuitenkaan ole kannattava pahimmassa mahdollisessa skenaariossa. Oppimisympäristön arvolla on suurempi merkitys investoinnin kannattavuuteen kuin polttoaineen hinnalla. Pahimman mahdollisen skenaarion toteutuminen on kuitenkin erittäin epätodennäköistä. Investoinnin kannattavuuteen vaikuttaa eniten oppimisympäristön tuottama arvo.

## 9. Pohdinta

Tässä opinnäytetyössä esisuunniteltu tuotantolaitos tulee toimimaan oppimisympäristönä. Kuten opinnäytetyön rajauksesta käy ilmi, tämä opinnäytetyö on toteutettu pelkästään lämmöntuotantoa ajatellen. Puusta saatavan tuotekaasun käytössä on kuitenkin monia muitakin mahdollisuuksia.

Energia-alan osaaminen on paljon muutakin kuin itse energian tuotanto. Alalla tarvitaan erikoisosaamista usealla eri alalla. Muiden alojen osaamista voidaan spesifioida mm. seuraaviin työtehtäviin: kunnossapito, hitsaus, sähkötyöt, automaatio, laadukas polttoaine, prosessiosaaminen, logistiikka, ajoneuvojen konvertointi.

Uusiutuvan energian osaamisen tarve jatkaa kasvamistaan, ja REDUlla on pitkät perinteen energiantuotannon osaajien kouluttajana. Tuotantolaitoksen ja laitteiston valinnassa onkin mietitty myös muuta käyttöä tuotekaasulle. Ajatuksena tulevaisuudessa on, että nyt Lapin koulutuskeskus REDUssa alkaneen CO<sub>2</sub>REDUction-esiselvityshankkeen myötä luotaisiin täysin uudenlainen, monialainen oppimisympäristö. Tässä oppimisympäristössä puukaasun tuotanto olisi vain yksi osa suurempaa uusiutuvan energian

tuotannon kokonaisuutta. Uusi oppimisympäristö rakennuksineen tukee myös REDUn kiinteistöstrategiaa.

Tällainen moderni oppimisympäristö toisi toteutuessaan merkittävästi lisäarvoa uusien opiskelijoiden halukkuuteen hakeutua aloille, jotka käyttävät oppimisympäristöä opintojen aikana. Lisäksi REDUn imagollinen arvo nousisi vähähiilisten energiaratkaisujen myötä. Vähähiilisiä energiaratkaisuja voidaan myös välittää opetuksen kautta opiskelijoille, jolloin opiskelijoiden energiatietous myös kasvaisi.

Tätä opinnäytetyötä suunniteltaessa ja itse opinnäytetyön tekemisen aikana on myös tehty EU-rahoitteinen hankehakemus ”CO<sub>2</sub>REDUction esiselvitys”, jolle on myönnetty rahoitus. Esiselvityksessä esisuunnitellaan uusi monialainen oppimisympäristö, jossa on uusiutuvan energian tuotannossa käytettäviä uuden teknologian laitteistoja. Tässä oppimisympäristössä olisi myös mukana seuraavat uusiutuvan energian tuotantomuodot: aurinko, tuuli, biokaasu, lämpöpumput, bioenergia, metanointi, ORC- sekä kaasuturbiini.

Suunniteltavana olevassa oppimisympäristössä tuotekaasu metanoidaan ja käytetään korkeamman jalostusasteen polttoaineena joko liikenteessä tai sähköntuotannossa kaasuturbiinilla. Metanointi laitteisto toimisi myös biokaasun jalostuksessa sekä mahdollisesti tuotantolaitoksen mekaanisen arinakattilan savukaasujen hiilidioksidin talteenotosta saatavan CO<sub>2</sub> :n metanoinnissa. Tällöin metanointilaitteiston investointikustannus olisi pienempi kuin pelkän tuotekaasun metanointiin käytettynä.

Liikennepolttoaineen käyttö mahdollistaa REDUn ajoneuvokannan konvertoinnin kaasukäyttöiseksi, joita voitaisiin käyttää tuotetulla liikenteen polttoaineella. Olemassa olevien autojen konvertoinnin kaasukäyttöiseksi toteuttaisivat autoalan opiskelijat.

Puukaasun tuotanto ja käyttö lämmöksi on itsenäisestikin hyvä ratkaisu uutena oppimisympäristönä. REDU on jo pitkään toteuttanut koko energiantuotantoketjun ”kannosta kattilaan” opiskelijatyönä. Uudella oppimisympäristöllä voitaisiinkin vahvistaa entisestään bioenergian tuotannon koulutusta tuotannon jokaisessa vaiheessa.

## 10. Lähteet

- Alakangas, E. 2001. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Espoo: Otamedia Oy.
- Basu, P. 2018. Biomass Gasification. Pyrolysis and Torrefaction. Elsevier. Science & Technology
- Bhattacharyya, B & Bera, S. C. 2009. Mechanical Science-II. New Delhi: New age international (P) Limited publishers.
- Energiataloudellinen yhdistys. 1987. Lämpökeskuksen käyttäjän käsikirja. Helsinki: Ekono Oy.
- Gränö, U-P. 2009. Highbio projekti INFO 27. Kokkola: Jyväskylän yliopisto. [https://ciweb.chydenius.fi/project\\_files/HighBio%20projekti%20INFO/INFO%20HighBio%20F27.pdf](https://ciweb.chydenius.fi/project_files/HighBio%20projekti%20INFO/INFO%20HighBio%20F27.pdf) . 21.2.2021.
- Härkönen, M. 2012. Puun polttoainekäyttö pienissä aluelämpölaitoksissa. Kokkola: Keskipohjanmaan ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/41034/Puun%20polttoainekaytto.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ilmatieteenlaitos. 2021. Lämmitystarveluvut. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/lammitystarveluvut>  
<http://cdn.fmi.fi/weather-observations/products/heating-degree-days/lammitystarveluvut-YYYY.utf8.csv>
- Jormakka, R. Koivusalo, K. Nikander, M. Niskanen, M. 2015, Laskentatoimi, Helsinki, Edita Publishing Oy
- Karjalainen, T. 2012. Pienimuotoisen lämmön ja sähkön yhteistuotannon tilannekatsaus – laitteet ja niiden käyttöönotto. Oulu: Oulun yliopisto
- Lankinen, R. Hirvonen, M. Huttunen J. & Käyhkö, R. 2013. Hajautetut energiaratkaisut – Uusiutuvaa energiaa alueellisesti ja kestävästi. Kuopio: Karelia-ammattikorkeakoulu. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/86224/ISAT\\_2013\\_3.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/86224/ISAT_2013_3.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Larsson A, Gunnarsson I & Tenberg, F 2018. The GoBiGas Project. Demonstration of the Production of Biomethane from Biomass via Gasification. Göteborg: Göteborg Energi AB
- Ojalainen, J. 2013. Viulun kuivauksen energiatehokkuuden parantaminen. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Energiatekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. [https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/103624/dippa\\_uusin\\_julkisen\\_liitteet\\_poisettu\\_3\\_12\\_13.pdf](https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/103624/dippa_uusin_julkisen_liitteet_poisettu_3_12_13.pdf)
- Pandey, A. Bhaskar, T. Stöcker, M & Sukumaran, R. K. 2015. Recent advances in thermochemical conversion of biomass. Elsevier B. V.



- Pieniniemi, K & Muilu, Y. 2011. Biomassan kaasutus sähköksi, lämmöksi ja biopolttoaineiksi – Highbio-projektijulkaisu. Kokkola: Jyväskylän yliopisto. Kokkolan yliopistokeskus Chydenius.  
<https://jyx.jyu.fi/bitstream/handle/123456789/27058/1/978-951-39-4313-4.pdf> . 16.2.2021,
- Raiko, R. Kurki-Suonio, I. Saastamoinen, I. Hupa, M. 2002, Poltto ja palaminen. Jyväskylä: Teknistieteelliset akatemit.
- Raitila, J. 2009., Polttopuun luonnokuivaus, keinokuivaus ja laadun hallinta. VTT. [http://www.puulakeus.net/docs/120-reu-Polttopuun\\_kuivaus\\_Toholampi.pdf](http://www.puulakeus.net/docs/120-reu-Polttopuun_kuivaus_Toholampi.pdf) . 14.2.2021.
- Saranpää, P. 2018. Tapion Taskukirja. Metsäkustannus.
- Thunman, H. Seemann, M. Vilches, T. B. Maric, J. Pallares, D. Ström, H. Berndes, G. Knutsson, P. Larsson, A. Breitholtz, C & Santos, O. 2018, Advanced biofuel production via gasification – lessons learned from 200 man- years of research activity with Chalmers' research gasifier and the GoBiGas demonstration plant. Göteborg: Society of Chemical Industry and John Wiley & Sons Ltd. 17.2.2021.
- Tilastokeskus. 2021. Tärkeimpien öljytuotteiden kuluttajahinnat. Tilasto: Energian hinnat [verkojulkaisu]. ISSN=1799-7984. 3. Vuosineljännes 2020, Liitekuvio 2. Tärkeimpien öljytuotteiden kuluttajahinnat . Helsinki: Tilastokeskus 24.2.2021
- Tilastokeskus. 2021. Nord Pool Spot sähköpörssin kuukausikeskiarvot Tilasto: Energian hinnat [verkojulkaisu]. ISSN=1799-7984. 3. Vuosineljännes 2020, Liitekuvio 6. Nord Pool Spot -sähköpörssin kuukausikeskiarvot. Helsinki: Tilastokeskus 24.2.2021
- Suomen Kaasuenergia. 2021. Energian myyntihinta. Tempo-hinnasto. <https://suomenkaasuenergia.fi/tuotteet-ja-palvelut/hinnasto-teollisuudelle/> 26.3.2021
- Tevä-Helminen, V. 2013. Investointilaskenta ja päätöksenteko. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Opetusmoniste. <https://docplayer.fi/495691-Metropolia-ammattikorkeakoulu-investointilaskenta-ja-paatoksenteko-opetusmoniste.html> . 26.2.2021
- TUKES. 2021. [Painelaitteet, https://tukes.fi/tuotteet-ja-palvelut/painelaitteet/painelaitteen-kaytto/maaraaikaistarkastus-ja-seuranta](https://tukes.fi/tuotteet-ja-palvelut/painelaitteet/painelaitteen-kaytto/maaraaikaistarkastus-ja-seuranta) [viitattu 18.2.2021]
- TUKES. 2021. <https://tukes.fi/tuotteet-ja-palvelut/painelaitteet/painelaitteen-kaytto/painelaitteen-kaytonvalvoja#6580d686> 18.2.2021