

Jouko Järvinen

Puukaasu kiinteistön energialähteenä

Opinnäytetyö

Insinööri (Amk)

Talotekniikan koulutus

2021



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Talotekniikka (AMK)
Tekijä	Jouko Järvinen
Työn nimi	Puukaasu kiinteistön energianlähteenä
Toimeksiantaja	
Vuosi	2021
Sivut	43 sivua
Työn ohjaaja	Jarkko Kolehmainen

TIIVISTELMÄ

Tässä opinnäytetyössä oli tarkoituksena selvittää puukaasutinlaitteiston käytön mahdollisuuksia pientalon energiantuotannossa. Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää puukaasutinlaitteen toimintaa sekä taloudellista kannattavuutta pientalon energianlähteenä. Laitteistokokonaisuus koostuu puukaasuttimen lisäksi bensiinimoottorista sekä sähkögeneraattorista.

Työssä tutustuttiin puukaasutinlaitteen toimintaan kirjallisuuden avulla sekä selvitettiin tarvittava laitteistokokonaisuus energiantuottamiseksi kiinteistölle. Työssä laskettiin esimerkkikohteelle tarvittavat energiamäärät eri vuodenaikoina, joiden perusteella suoritettiin laskentaa tarvittavista polttoainemääristä sekä näiden kustannuksista. Laskettuja kustannuksia verrattiin mm. hakeämmitykseen, ja tämän perusteella pohdittiin puukaasutuksen kannattavuutta. Kannattavuutta tarkasteltiin myös laitteiston koko käyttöäälle huomioiden investointikustannukset. Lisäksi työssä pohdittiin laitteiston toteutusta kiinteistön osalta huomioiden mm. turvallisuuden sekä laitteiston asettamat eri vaatimukset.

Puukaasutuksella energiantuotanto on edullista, varsinkin jos polttoainetta on saatavilla omasta takaa. Ongelmana laitteiston kannattavuudessa nousee sen suuret investointikustannukset. Laitteistoa ei ole pienessä kokoluokassa kaupallisesti saatavilla, minkä vuoksi hankkiminen on kallista. Laitteiston käyttö vaatii myös hieman työtä johtuen huolloista, joka voisi olla esteenä laitteen yleistymiseen. Laitteiston sähköntuotannon hyötysuhdetta voitaisiin parantaa moottorin valinnalla, mutta siitä huolimattakaan ei päästä kustannuksissa tarpeeksi alas, jotta investointi olisi kannattavaa. Puukaasutuslaitteistoa ei kannata hankkia pientaloon nykyisellä sähkönhinnalla, mutta sähkönhinnan kasvaessa laitteisto voi olla tulevaisuudessa hyvä vaihtoehto myös pientalon energiantuotantoon.

Asiasanat: Puukaasu, Häkäpönttö, Energiantuotanto, Lämmitysjärjestelmä

Degree	Bachelor of Engineering
Author	Jouko Järvinen
Thesis title	Wood gas as an energy source for a property
Commissioned by	
Time	2021
Pages	43 pages
Supervisor	Jarkko Kolehmainen

ABSTACT

The purpose of this thesis was to find out possibilities of energy production for a small house by using wood gasification. The objective was to examine the operation of wood gasification and calculate the economic viability when used for energy production of a small house. The device consists of a wood gasifier, a combustion engine and an electric generator.

Not much information about wood gasification technology is available, so the first thing was to examine energy production volumes and the efficiency of the device. After finding out the needed information about the device, energy production costs were calculated. The calculated costs were compared to wood chip heating. The profitability was also calculated for the whole service life of the equipment, paying attention to the investment costs. Furthermore, the potential of wood gasification was examined in terms of different demands set by equipment and safety standards.

Energy production with wood gas is cheap especially if the fuel is already available. The problem with the profitability is its big investment costs. There is no commercially available device in a small size, which is why the investment is so expensive. The use of the device also requires maintenances which could be an obstacle to becoming a common way to produce energy. The efficiency rate of the electricity production could be raised with a better choice of the motor, but even with a better electricity production ratio, the investment is too big to make it profitable. The wood gasification system is not a profitable solution for a small house with the present electricity prices but in future if the electricity prices rise, wood gasification can be a good alternative for the energy production of a small house.

Keywords: Wood gas, gasification, energy production, micro-CHP

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	PUUKAASUTUS.....	7
2.1	Tuotanto	7
2.2	Laitteisto	8
2.2.1	Puukaasutin	8
2.2.2	Polttomoottori.....	12
2.2.3	Sähkögeneraattori	13
2.3	Polttoaine.....	15
2.3.1	Pilke	15
2.3.2	Hake	15
2.3.3	Turve.....	16
2.3.4	Hiili	17
2.3.5	Pelletti	17
3	PUUKAASUTUKSEN PÄÄSTÖT.....	18
4	ENERGIANTUOTANTO PUUKAASULLA	19
5	ESIMERKKIKOHDE JA LASKENTA.....	21
5.1	Lähtötiedot.....	22
5.1.1	Polttoaineiden hinnat	22
5.1.2	Sähkönhinta.....	22
5.2	Laskenta	23
5.2.1	Energiantarve	24
5.2.2	Polttoaineen kustannukset.....	27
5.2.3	Hakelämmitys	28
5.2.4	Elinkaaritarkastelu	29
5.3	Kannattavuus.....	29
6	TULOKSET JA TARKASTELU	30
6.1	Energian tarve	30

6.2	Polttoaineen kustannukset.....	31
6.2.1	Sähkön täysi tuotto	31
6.2.2	Sähkön osittainen tuotto	31
6.3	Järjestelmien elinkaaritarkastelu.....	33
7	PUUKAASUTUSLAITTEISTO OSANA KIIINTEISTÖN LÄMMITYSJÄRJESTELMÄÄ.	35
7.1	Riskit.....	36
7.1.1	Häkämyrkytys	36
7.1.2	Toimintavarmuus	36
7.2	Varaaja	37
8	POHDINTA.....	38
	LÄHTEET.....	41

1 JOHDANTO

Pariisin ilmastopöytäkirjan mukaan sopimuksen osapuolten on pyrittävä toimiin, jotta ilmaston lämpeneminen saataisiin rajattua alle 1,5 asteen, jolla tarkoitetaan alailmakehän sekä merien keskilämpötilan nousua esiteollisesta ajasta. Suomen tulisi olla hiilineutraali vuoteen 2030 mennessä pysyäkseen tässä tavoitteessa. Tärkeimpinä keinoina ilmastonmuutoksen rajoittamiseen on mm. fossiilisista polttoaineista luopuminen, uusiutuvien energiamuotojen käyttö sekä liikenteen sähköistäminen.

Energiantuotannossa pyritään lisäämään uusiutuvan energian osuutta ja pyritään eroon mm. kivihiihen sekä öljyn käytöstä. Suomen uusiutuva energia painottuu puun ja bioperäisten kierrätyspolttoaineiden käyttöön. Vuoteen 2030 mennessä pyritään eroon myös pientalojen öljylämmityksestä. Joissakin tapauksissa tämä voi tarkoittaa esimerkiksi syrjässä sijaitsevan pientalon lämmitysjärjestelmän uusimista.

Sähkön pientuotannon mielenkiinto on kasvanut kuluttajien keskuudessa nousevan sähkön hinnan vuoksi. Normaalisti puuta käytetään pientaloissa ainoastaan lämmitykseen sitä polttamalla. Puuta kaasuttamalla on kuitenkin mahdollista tuottaa lämmön lisäksi myös sähköä, jopa pieneen tarpeeseen.

Tässä opinnäytetyössä tutustutaan puukaasuttimen toimintaan sekä selvitetään sen mahdollisuuksia pientalon energiantuotantotapana. Tavoitteena työssä on selvittää, onko taloudellisesti kannattavaa tuottaa sähköä ja lämpöä pientalon tarpeisiin puukaasuttamisen avulla.

Työssä tutustutaan puukaasuttamisen toimintaan kirjallisuuden ja muiden tietojen perusteella sekä lasketaan energiantuotannon kustannuksia normaalin pientalon kulutuksien perusteella. Työssä lasketaan myös, onko sähkön ja lämmön tuottaminen pienessä mittakaavassa kannattavaa ja saadaanko molemmat energiamuodot hyödynnettyä energiatehokkaasti. Kannattavuutta pohditaan mm., onko parempi tapa vain polttaa puuta ja ostaa sähköä.

2 PUUKAASUTUS

Hiilimonoksidi on hiilen ja hapen yhdiste, joka on helposti syttyvä kaasu. Hiilimonoksidista käytetään myös nimitystä häkä. Häkää syntyy, kun hiiltä sisältävät aineet palavat alhaisessa happimäärässä. Häkää voidaan hyödyntää energiantuotannossa sekä esimerkiksi ajoneuvojen polttoaineena palamisominaisuuksiensa vuoksi.

Kattilalaitosten toiminnassa pyritään mahdollisimman puhtaaseen palamiseen, minkä vuoksi savukaasuissa on hiilimonoksidia (CO) vain vähän. Kiinteistökohtainen puulämmitys taas aiheuttaa suuremmat päästöt, sillä palaminen ei ole niin puhdasta. [1, s.55.]

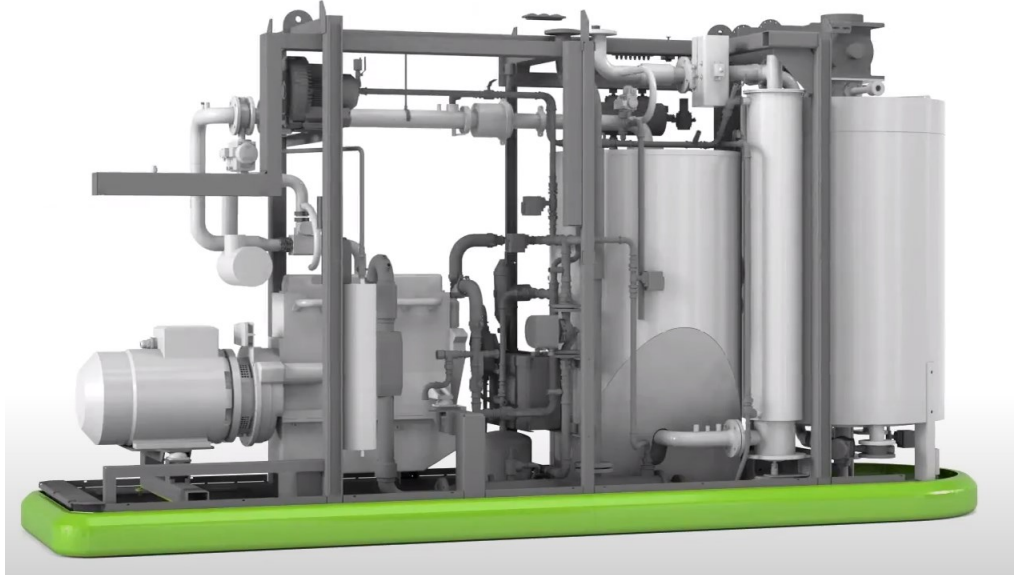
Jos palamisilmaa on vain vähän, sisältävät savukaasut paljon hiilimonoksidia ja nokea. Jos ilmamäärää lisätään, niin savukaasujen häkäpitoisuus vähenee, hiilidioksidipitoisuus kasvaa ja se alkaa sisältämään ylimääräistä happea. Hyvässä palamisessa savukaasut eivät sisällä hiilimonoksidia. Jos palaminen on huonoa ja savukaasut sisältävät hiilimonoksidia, kaikki lämpöenergia ei tule käytetyksi. Jos palamiseen lisätään liikaa happea, niin ylimääräinen happi ja typpi vievät lämpöä hukkaan. [1, s. 52.]

Tuottamalla häkää puusta voidaan puuta hyödyntää muuhunkin kuin lämmön tuottamiseen. Puukaasua on hyödynnetty ajoneuvojen polttoaineena, mutta sitä voidaan myös hyödyntää sähkön tuottamiseen mm. polttomoottoreiden avulla. Häkää voidaan käyttää polttomoottorin polttoaineena, jolloin liike-energialla voidaan tuottaa sähköä.

2.1 Tuotanto

Jotta puukaasulla voidaan tuottaa energiaa, kaasutetaan puuaines ensin puukaasuttimessa. Kaasuttimessa tuotetusta kaasusta poistetaan lisäksi epäpuhtauksia, kuten noki, terva ja vesi. Tämän jälkeen kaasua jäähdytetään. Kun laitteistossa on tuotettu palamiskelpoista kaasua ja se on puhdistettu, johdetaan kaasu polttomoottorille. Kaasua syötettäessä polttomoottorille sekoitetaan siihen vielä ilmaa, jotta kaasusta saadaan polttomoottorissa palamiskel-

poista. Polttomoottorilla pyöritetään sähkögeneraattoria, jolla saadaan tuotettua sähköä kiinteistölle. Laitteisto olisi mahdollista varustaa myös akustolla, mutta tämä lisäisi laitteiston kustannuksia. Puukaasuttimessa sekä polttomoottorissa tapahtuu lämpöhäviöitä, joita voidaan ottaa talteen sekä hyödyntää kiinteistön lämmityksessä. Kuvassa 1 on esitetty laitteistokokonaisuuden toteutus.



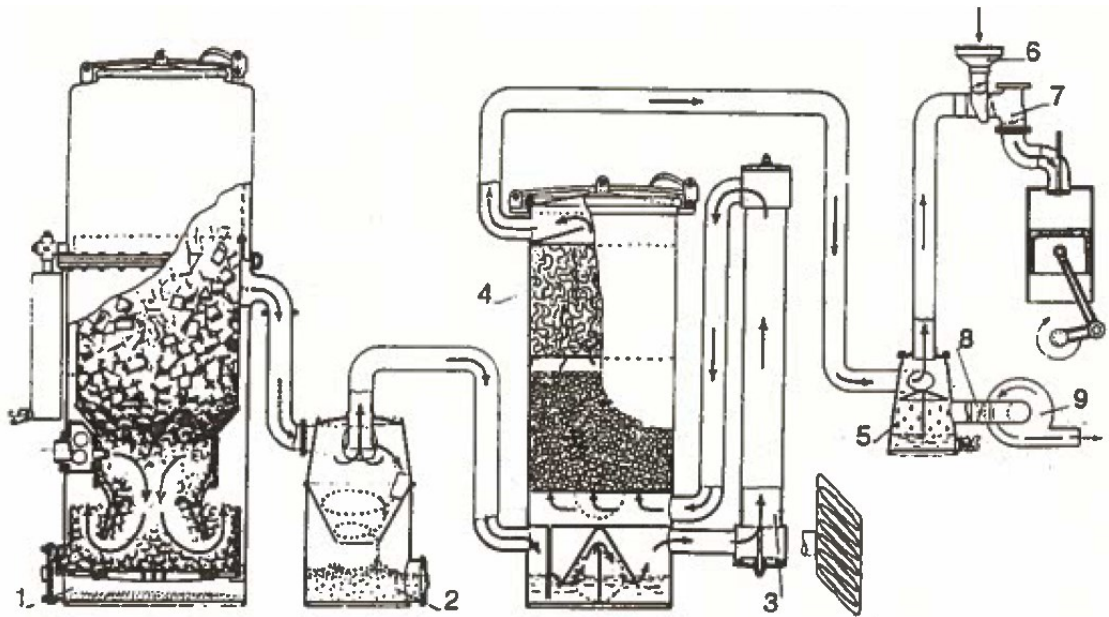
Kuva 1. Laitteisto kokonaisuudessaan [22]

2.2 Laitteisto

Laitteisto koostuu puukaasuttimesta, jossa polttoaine kaasutetaan, sekä polttomoottorista, jota käytetään tuotetulla kaasulla sähkögeneraattorin pyörittämiseen, minkä seurauksena mekaaninen liike-energia saadaan muutettua sähköenergiaksi.

2.2.1 Puukaasutin

Puukaasutin (kuva 2) on laite, jolla tuotetaan hiilimonoksidia polttamalla puuta pienellä happimäärällä. Kaasuttimen pääosat ovat kaasunkehitin (1), pyörrepuhdistin (2), jäähdytin (3), hienopuhdistin (4), vedenerotin (5), ilmanpuhdistin (6), sekoitusventtiili (7) sekä imuri (9). [2, s. 38.]



Kuva 2. Kaasun kulku moottoriin [2]

Kaasunkehitin

Kaasunkehittimessä polttoaineesta tuotetaan hiilimonoksidia sisältävää kaasua. Polttoaineen palaessa kaasuttimessa lämpötila nousee jopa 1400 asteeseen, jonka seurauksena alkaa syntyä hiilidioksidia (CO₂) sekä vesihöyryä. Hiilidioksidi on palamaton kaasu, joten se täytyy pelkistää hiilimonoksidiksi (CO) johtamalla se hehkuvan hiilikerroksen lävitse. Tällöin tapahtuu reaktio $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$, jolloin saadaan palavaa kaasua eli häkää. Pelkistyksessä kaikkea hiilidioksidia ei kuitenkaan saada muutettua hiilimonoksidiksi. Tuotettu kaasu sisältää myös typpeä, vetyä ja hiilivetyjä. [2, s. 39.]

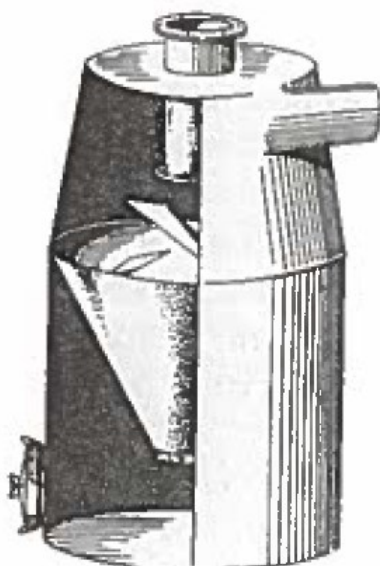
Kaasusuodatus

Kehittimen jälkeen kaasu johdetaan puhdistimeen, jossa kaasusta erotellaan epäpuhtaudet, kuten nokihiukkaset. Kaasutuksessa syntyvät epäpuhtaudet ja ylimääräinen vesi tulee poistaa tuotetusta kaasusta, jotta kaasua voidaan käyttää polttoaineena. [2, s. 39.]

Kaasun puhdistukseen on eri menetelmiä. Kaasun suodattaminen on kuitenkin helpointa toteuttaa kangassuodattimen avulla. Kehittimen jälkeen kaasu kuitenkin sisältää vielä paljon epäpuhtauksia sekä kipinöitä. Tämän vuoksi kaasu tulisi ns. karkeasuodattaa pyörrepuhdistimessa, jotta kipinät eivät pääse vaurioittamaan kangassuodatinta. Suodattimen materiaalin tulee kestää

riittävästi lämpöä tai vastaavasti kaasua on jäähdytettävä ennen suodattamista. Sopiva lämpötila suodatukselle on noin 120- 240 °C. [7, s. 65.]

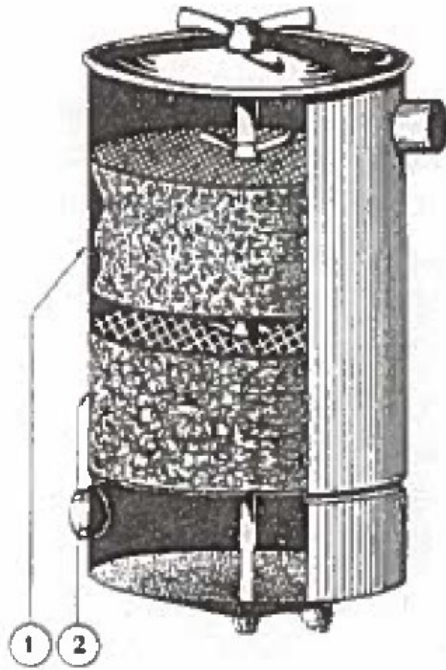
Kuvassa 3. on esitetty eräänmallinen karkeasuodatin, joka on ns. pyörrepuhdistin. Tuotettu kaasu johdetaan puhdistimeen vaakasuorassa olevan putken kautta, jolloin kaasuun aiheutuu voimakas pyörreliike. Pyörteen ansiosta kiinteät epäpuhtaudet saadaan eroteltua kaasusta ja ne valuvat puhdistimen pohjalla olevaan kartioon. Puhdistettu kaasu poistuu suodattimesta sen kannessa olevan putken kautta. [2, s. 42.]



Kuva 3. Karkeasuodatin

Mikäli lämpötila jää suureksi, voidaan suodatusmateriaalina käyttää lasikuitua. Suodattimet ovat laitteiston yksi huoltokohde, sillä suodattimia tulee puhdistaa määräajoin riippuen käytön määrästä. Mikäli suodattimia ei puhdisteta riittävästi, laitteiston toiminta jää puutteelliseksi sekä likainen kaasu kuluttaa moottoria sekä lisää moottorin öljynvaihdon tarvetta.

Karkeasuodattimen jälkeen kaasu ei ole vielä tarpeeksi puhdasta polttomoottorissa poltettavaksi, joten kaasua tulee suodattaa lisää. Lopullinen suodatus tehdään hienosuodattimessa, joka voi olla esimerkiksi kangassuodatin. Kuvassa 4 on esitetty hieman erilainen hienosuodatin, jossa suodatusmateriaalina toimii lastuvillakerros (2) sekä puunappulakerros (1). Kyseisessä puhdistimessa kaasu kulkee alhaalta ylöspäin. [2, s. 42.]



Kuva 4. Hienosuodatin

Lauhdutin

Lauhduttimessa tuotetun kaasun lämpötilaa lasketaan, jotta sen tilavuus pienenee ja moottoriin saadaan syötettyä suurempi määrä kaasua.

Kaasun jäähdytys voidaan toteuttaa perinteisen lauhduttimen avulla tai nestejäähdyhteisesti. Jäähdyttimen valinnassa tulee huomioida, että reitti, jossa kaasu virtaa, tulisi pystyä puhdistamaan. Yleisesti jäähdyttimet ovat valmistettu alumiinista, mutta kaasu aiheuttaa alumiinin syöpymistä.

Imuri

Käynnistystuulettimella eli imurilla luodaan tarvittava veto kaasuttimeen, jota sytyttämisvaiheessa tarvitaan. Käynnistäessä kaasutusta joudutaan kaasutinta esilämmittämään jonkin aikaa, jotta häkää alkaa muodostua riittävästi.

Sekoitusventtiili

Sekoitusventtiilillä puhdistettuun kaasuun sekoitetaan sopiva määrä ilmaa, jotta kaasusta saadaan polttomoottorissa palamiskelpoista seosta [2, s. 38]. Tuotetun kaasun laatu vaihtelee hieman, minkä vuoksi ilman ja kaasun suhdetta saatetaan joutua säätämään polton aikana. Suhdetta voidaan säätää esimerkiksi pakokaasuista mitattujen jäännöshappimäärien perusteella.

2.2.2 Polttomoottori

Polttomoottoreiden toiminta perustuu jatkuvaan tilavuuden, lämpötilan ja paineen muutokseen. Tilavuuden muutos toteutetaan usein sylinterissä edestakaisin liikkuvan männän avulla. Moottoriin viedyn polttoaineen energialla lämmitetään kaasua, jonka vuoksi paine sekä lämpötila kasvavat. Tuotettu paine synnyttää voiman mäntään, joka synnyttää männälle liikkeen. Männän liike muutetaan pyörintäliikkeeksi kiertokangen ja kampiakselin avulla. Polttomoottoreissa palaminen tapahtuu nopeasti ja männän rajoittamassa pienessä tilavuudessa. [9, s. 135.]

Polttomoottorin valinnassa tulisi pohtia siltä vaadittavaa tehoa. Jokaisessa kohteessa sähkökuormat ovat hieman erilaisia, mutta riittävän tarkkaan mitoituksen päästään jos käytetään virrantarpeena 25 ampeeria, joka on pientalojen yleinen sähköliittymäkoko. Jännitteen osalta mitoituksessa käytetään Suomessa kotitalouksissa käytettävää pääjännitettä 400 voltia, joka on vaiheiden välinen jännite (vaihejännite 230 V). Tällöin kodin sähkölaitteita voidaan käyttää ilman erillistä jännitteen muunnosta. Tarvittava teho saadaan laskettua kaavalla:

$$P = \sqrt{3} * U * I \quad (1)$$

jossa

P	Teho	[W]
U	Jännite	[V]
I	Virta	[A]

$$\sqrt{3} * 400V * 25A = 17320W \approx 17kW$$

Muutettuna hevosvoimiksi:

$$17,32kW * 1,34 = 23,2hv$$

Generaattorin hyötysuhteen ollessa esimerkiksi 90%, polttomoottorin tehoksi saadaan:

$$23,2hv/0,9 = 25,8hv$$

Puukaasun räjähdysseoksen lämpöarvo on noin 2500kJ/m³, kun taas bensiinin ja ilmanseoksella lämpöarvo on noin 3800kJ/m³. Puukaasun lämpöarvo on siis noin 35 % pienempi, mutta moottorin tehon menetys on tätäkin suurempi, koska puukaasu palaa hitaammin ja sylinterin täytös jää vajaammaksi. Käytettäessä puukaasua polttomoottorissa bensiinin sijasta, laskee moottorin teho noin puoleen. [7, s.12].

$$25,8hv/0,5 = 51,6hv$$

Laskettu teho tulisi saavuttaa käytetyllä kierrosnopeudella. Mikäli moottorin huipputehoa ei saavuteta kyseisellä kierrosnopeudella, niin tulee moottorin tehon olla laskettua suurempi. Bensiinimoottorin hyötysuhteena voidaan pitää noin arvoa 25 % [8].

2.2.3 Sähkögeneraattori

Sähkögeneraattori (kuva 5) on laite, jolla muutetaan mekaanista liike-energiaa sähkövirraksi. Sähkögeneraattorit voidaan jakaa eri ryhmiin riippuen niiden rakenteesta. Yleisin vaihtosähkögeneraattori on tahtigeneraattori. Tahtigeneraattorin roottoria pyöritetään, jolloin roottorin magneettinapojen magneettikentät leikkaavat staattorin johtimia luoden niihin jännitteen. Roottori voidaan magnetoida erillisellä magnetointigeneraattorilla tai kesto-magneeteilla. [12, s. 265.]



Kuva 5. Sähkögeneraattori [25]

Yleisen sähkönjakeluverkon taajuus Suomessa on 50 Hz. Taajuus ilmoittaa yhden sekunnin aikana esiintyvien jaksojen määrän.

Tuottaessa sähköä generaattorin avulla on sähkön taajuus saatava kohdilleen. Hyvä tapa olisi pyörittää generaattoria nopeudella, jolla saataisiin taajuudeksi suoraan 50 Hz. Ylimääräisten häviöiden välttämiseksi ajatellaan generaattori kytkettävän suoraan moottoriin ilman vaihteistoa. Kytkettäessä generaattori suoraan moottoriin on tuotetun sähkön taajuus riippuvainen moottorin pyörintänopeudesta. Moottoreiden pyörintänopeutta seurataan yleensä kierroksina minuutissa. Pyörintänopeutena tulisi tällöin käyttää 3000rpm.

Pyörintänopeuteen on kuitenkin mahdollista vaikuttaa esimerkiksi generaattorin rakenteen perusteella. Jos generaattori on kaksinapainen, kertoo kierrosnopeus suoraan jännitteen taajuuden. Jos käytetään esimerkiksi nelinapaista generaattoria, päästään 50Hz taajuuteen jo 1500 rpm nopeudella. [12, s. 266.] Työssä ajatellaan käytettävän bensiinimoottoria, jolloin kierrosnopeutena olisi parempi käyttää 3000 rpm, kun taas jos käytettäisiin dieselmoottoria voisi olla kannattavampaa pyörittää moottoria 1500 rpm nopeudella. Tavoiteltava taajuus olisi myös mahdollista saavuttaa taajuusmuuttajan avulla.

2.3 Polttoaine

Puukaasutuksessa polttoaineena voidaan käyttää monia eri vaihtoehtoja. Polttoaineena voidaan käyttää eri puita, mutta myös mm. turvetta, hiiltä sekä eri biomassoja. Käytettävän polttoaineen valinta vaikuttaa mm. tuotettavan kaasun määrään johtuen esimerkiksi puiden eri tiheyksistä. Polttoaineen valintaa ei kuitenkaan kannata lähteä rajaamaan tietyn puulajin osalta, vaan enemmänkin näiden hinnan ja saatavuuden osalta. Koska eri puita voidaan kaasuttaa, kannattavinta olisi hyödyntää jättepuuta, jolle ei olisi oikein muutakaan käyttöä. Kannattavuuden osalta jättepuu olisi myös edullisin vaihtoehto.

Puiden lämpöarvo kertoo palamisessa kehittyneen lämmön määrän suhteessa polttoaineen massaan. Eri puulajien lämpöarvot sijoittuvat välille 18,5–20 MJ/kg. Polttoaineen lämpöarvoa laskee sen sisältämä kosteus, koska palassa veden haihduttaminen vaatii energiaa. [10.]

2.3.1 Pilke

Pilkkeellä tarkoitetaan puusta noin 5 cm pituisiksi pätkittyjä kappaleita. Pilke on hyvä polttoaine käytettäväksi puukaasuttimessa. Pilkkeen käytössä hyvänä puolena on se, että pelkistyshiilikerroksesta muodostuu helposti kaasua läpäisevä, mikä vähentää kaasuttimen tukkeutumisen riskiä vähäisen tuhkan määrän vuoksi. Pilkettä voidaan valmistaa mistä tahansa puulajista. [7, s. 26.]

2.3.2 Hake

Haketta (kuva 6) voidaan myös käyttää kaasuttimen polttoaineena, mutta verrattuna pilkkeeseen jää tiheys usein alhaisemmaksi. Hakkeena ei kuitenkaan ole suositeltavaa käytettävän liian hienorakenteista haketta, jota usein hakeämmityksessä käytetään. Riskinä liian hienon hakkeen käytössä syntyy polttoaineen valumisen epätasaisuus sekä polttoaika jää pienemmäksi johtuen alhaisemmasta tiheydestä. Kaasuttimen polttoaineeksi ei sovellu mikään kovin pienijakoinen, kuten sahanpuru tai muut roskat, sillä ne häiritsevät kaasuttimen toimintaa. [7, s. 27.]



Kuva 6. Hakkeita [20]

2.3.3 Turve

Turve syntyy suokasvien hajotessa. Kasvijätteen maatumisen soilla on hyvin hidasta, minkä vuoksi turvetta pidetään uusiutumattomana energianlähteenä. Turpeen poltosta aiheutuu lähes samansuuruiset päästöt kuin fossiilisilla polttoaineilla, minkä vuoksi se rinnastetaan usein fossiilisiin polttoaineisiin. Lisäksi turpeen poltto isoissa kattiloissa tarvitsee tukipolttoainetta, joka on yleensä polttoöljyä. Turpeen käytön kannattavuutta heikentää myös sen energiasisällön suhde tilavuuteen, koska kuljetuskustannukset ovat tällöin korkeat. [23, s.22.]

Palaturve (kuva 7) on hyvä polttoaine kaasuttimelle. Turpeen tulisi kuitenkin olla hyvälaatuista polttoturvetta, jolla on alhainen tuhkapitoisuus. Turve tuottaa kuitenkin puuta enemmän kaasuun nokea ja tuhkaa, jonka vuoksi suodattimien puhdistustarve kasvaa. Huonoina puolina turpeessa on lisäksi sen säilytys sekä käsittely. [7, s. 26.]



Kuva 7. Palaturvetta [19]

2.3.4 Hiili

Hiili on syntynyt kasvien jätteistä 300 miljoonaa vuotta sitten. Hiilipitoisuus riippuu hiilen iästä. Vanhetessaan hiilipitoisuus kasvaa, jolloin sen lämpöarvokin kasvaa. Eri hiiliä on mm. rusko, kivihiili sekä antrasiitti. Maailman fossiilisista polttoainevaroista on kivihiltä (kuva 8) eniten. Hiilen käyttö energiantuotannossa on vähentymässä. [23, s.17.]

Hiiltä voidaan käyttää hiilikaasuttimissa, jotka eroavat puukaasuttimen rakenteesta. Käytettäessä hiiltä ei tervasta aiheudu ongelmia kaasuttimessa. Hiili on puuta kalliimpaa sekä vaikeammin saatavilla. [7, s.28.]



Kuva 8. Kivihiltä [21]

2.3.5 Pelletti

Puupelletti (kuva 9) on tuotettua polttoainetta, joka on valmistettu puuteollisuuden sivutuotteista. Myös pellettiä voidaan käyttää kaasutuksen polttoaineena. Ongelmana on se, että käytettäessä pellettiä on kaasuttimen rakenteen oltava sille sopiva. Pelletin hienojakoisuuden vuoksi ei sitä voida perinteisessä kaasuttimessa käyttää. Lisäksi haasteita saattaa aiheuttaa kosteus. Pelletin kostuessa sen rakenne hajoaa, jolloin se voi aiheuttaa kaasuttimen tukkeutumista. Pelletti on myös hinnaltaan kalliimpaa verrattuna esimerkiksi hakkeeseen. Hyvänä puolena pelletissä on sen kuivuus, jonka ansiosta energiasältö on suurempi. [7, s. 131.]



Kuva 9. Pellettiä [19]

3 PUUKAASUTUKSEN PÄÄSTÖT

Puuta pidetään uusiutuvana energianlähteenä, sillä kasvaessaan ne sitovat itseensä hiiltä. Kun puu lahoaa, sen varastoima hiili vapautuu takaisin ilmaan hiilidioksidina. Tämän vuoksi puuta kannattaa käyttää energiantuottamiseen. Puukaasun polttaminen ei lisää siis hiilidioksidipäästöjä. Kotimaista polttoainetta on myös paljon saatavilla, joka vähentäisi polttoaineen kuljettamisen tarvetta. Paikallisen energiantuotannon avulla välttyttäisiin pitkien matkojen energiansiirron häviöiltä erityisesti syrjäisemmillä seuduilla.

Perinteisen puun pienpolton on havaittu lisäävän ilmansaasteita 2000-luvulla paljon. Pienpoltosta syntyy jopa 40 % Suomen pienhiukkaspäästöistä, 55% mustan hiilen päästöistä, 80 % PAH-yhdisteiden päästöistä, 30 % VOC päästöistä sekä 25% hiilimonoksidin päästöistä [13].

Käytettäessä puukaasutinta on päästöt paljon pienempiä. Palaminen on paljon puhtaampaa johtuen mm. palamisen jatkuvasta säätämisestä pakokaasujen jäännöshapen perusteella sekä puukaasun hyvästä suodattamisesta ennen sen varsinaista polttoa.

Terveysvaikutusten vuoksi puunpolton ei oikein tulisi kuulua taajamiin saatikka kaupunkeihin, mutta haja-asutusalueilla ei oikein haittoja esiinny.

Puukaasulaitteiston osalta tiheään asutulla seudulla voisi nousta ongelmaksi meluhaitat, joita polttomoottorin käyttämisestä syntyy.

4 ENERGIANTUOTANTO PUUKAASULLA

Taulukossa 1. on esitetty tuotetun puukaasun koostumus. Taulukon suhteet saattavat muuttua paljonkin riippuen polttoaineesta, sen kosteudesta sekä eri kaasutintyypeistä.

Taulukko 1. Puukaasun keskimääräinen koostumus [2, s.39]

Hiilimonoksidi	CO	17-22%
Vety	H ₂	16-20%
Metaani	CH ₄	2-3%
Raskaat hiilivedyt	C _n H _m	0,2-0,4%
Hiilidioksidi	CO ₂	10-15%
Typpi	N ₂	45-50%

Energiantuotannon laskennan kannalta voidaan arvioida, että yhdestä kilosta polttoaineen kuiva-ainetta, eli noin 1,25kg ilmakeivää puuta, saadaan tuotetuksi 1 kWh sähköä ja noin 3 kWh lämpöä. Polttoaineen tehollinen lämpöarvo on noin 4,7kWh/kg polttoaineen kuiva-ainetta, josta saadaan hyödynnetyksi noin 4kWh/kg huomioiden häviöt. [7, s.119.]

Taulukko 2. Polttoaineen energian jakautuminen laitteistossa [7, s. 119]

1,3-1,5	kWh/kg	Moottorin jäähdytys
1,0-1,3	kWh/kg	Moottorin pakokaasuista
0,5	kWh/kg	Kaasun ja kaasuttimen jäähdytys
2,8-3,3	kWh/kg	Talteen saatu lämpöenergia
1,0	kWh/kg	Sähkö
0,4-0,9	kWh/kg	Häviöt

Muutettuna taulukon 2 arvot vastaamaan 1 kg ilmakeivää puuta taulukon 4 lämpöarvojen perusteella saadaan:

Taulukko 3. Polttoaineen energian jakautuminen laitteistossa

1,23	kWh/kg			Moottorin jäähdytys
1,025	kWh/kg			Moottorin pakokaasuista
0,41	kWh/kg			Kaasun ja kaasuttimen jäähdytys
2,665	kWh/kg	0,65	%	Talteen saatu lämpöenergia
0,82	kWh/kg	0,20	%	Sähkö
0,615	kWh/kg	0,15	%	Häviöt

Taulukoissa esitettyjen energianjakaantumisen arvot eivät ole tarkkoja vaan suuntaa antavia. Tarkat arvot saataisiin selvitettyä ainoastaan mittaamalla vastaavasta laitteesta. Arvot olisivat myös laitekohtaisia sekä polttoaineesta riippuvaisia. Laskennassa käytetään eri polttoaineille niiden omia lämpöarvoja, joiden tuotanto jakautuu taulukon 3 prosentiosuuksien mukaan.

Puukaasuttimessakin tapahtuu häviöitä, eikä kaikkea puun sisältämää energiaa saada käytettäväksi. Kaasutuksen hyötysuhteena pidetään 75 %. [7, s.141.]

Laitteistoon kuuluvana polttomoottorina laskelmissa käytetään nelitahti moottoria. Motiva ilmoittaa bensiinimoottorin hyötysuhteen olevan luokkaa 25 % [8], joten laskennallisesti tuotetun kaasun energiasisällöstä vain 25 % saadaan muutettua liike-energiaksi. Laitteiston kokonaishyötysuhteeseen vaikuttavat kaasutuksen, polttomoottorin, generaattorin sekä sähkölaitteiden hyötysuhteet.

Useiden puulajien lämpöarvot sijoittuvat välille 18,5 – 20 MJ/kg. Tämä kuitenkin on kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo, jossa ei ole huomioitu vedyn tuottaman veden haihduttamiseen kuluva energia.

$$\frac{MJ/kg}{3.6} = kWh/kg$$

Yhden kilon puuta kuiva-aineen energiasisällöksi saadaan siis:

$$\frac{19 \text{ MJ/kg}}{3.6} = 5.277 \text{ kWh/kg}$$

Puun sisältäessä kosteutta, ei todellisuudessa näin suureen lämpöarvoon päästä. Puhuttaessa ilmakeivasta puusta on sen kosteus edelleen noin 20 %.

Taulukko 4. Polttopuiden energiasisältö [11]

Puulaji	Lämpöarvo kWh/kg
Koivu	4,15
Mänty	4,15
Kuusi	4,1
Leppä	4,05
Haapa	4
Keskiarvo	n. 4.1

Taulukossa 4 esitettyjen puulajien energiasisällöt huomioiden puun sisältämän kosteuden (20 %) [11].

5 ESIMERKKIKOHDE JA LASKENTA

Pientaloissa energiaa kuluu eniten tilojen lämmitykseen. Energiaa tarvitaan myös käyttöveden lämmitykseen, kotitaloussähköön sekä jäähdytykseen. Energiantarpeiden jakautumiseen vaikuttaa mm. rakennuksen sijainti, esimerkiksi pohjoisessa lämmityksen osuus on suurempi kylmemmän ilmaston vuoksi. Taulukossa 5 on esitetty energiankulutuksen jakautuminen pientalossa.

Taulukko 5. Energiankulutuksen jakautuminen pientalossa [14]

50%	Lämmitys
20%	Lämmin vesi
30%	Kotitaloussähkö
2%	Mahdollinen jäähdytys

5.1 Lähtötiedot

Laskennassa käytettävän pientalon energiantarpeina käytetään:

Tilojen lämmitysenergian tarpeena: 10000kWh/a

Lämpimän käyttöveden energiantarpeena: 4200kWh/a

Kotitaloussähkön kulutuksena: 6000kWh/a

Laskennassa ei huomioida jäähdytystä.

Yhteensä: 20200kWh/a

5.1.1 Polttoaineiden hinnat

Laskettaessa energiantuotannon kustannuksia käytettäessä haketta käytetään tässä työssä hakkeelle lämpöarvona 900kWh/irto m³ ja hintana 20€/m³, eli noin 22€/MWh [18, s. 76].

Pelletille käytetään laskennassa hintana 260€/tonni energiasisällön ollessa 4,7 kWh/kg, eli 55€/MWh [27].

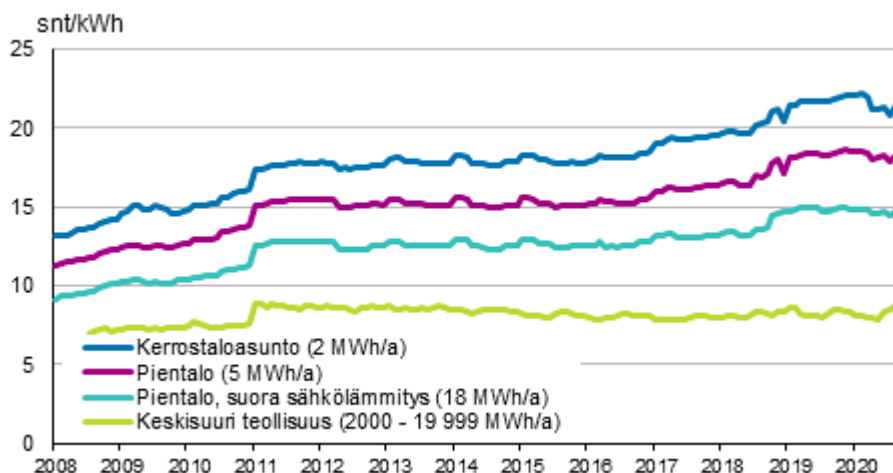
Polttopuille hintana 115€/p-m³ energia sisällön ollessa 1530kWh/p-m³, eli 75€/MWh [28].

Palaturpeelle 38 €/m³, energiatiheyden ollessa 1,15 MWh/m³, eli noin 33€/MWh [19].

Hiilenä käytettäessä antrasiittia energiasisältönä on 8,1kWh/kg ja hintana 1050€/tonni, eli 130€/MWh [21].

5.1.2 Sähkönhinta

Sähkönhinta Suomessa kuluttajalle koostuu sähköenergiasta, sähkönsiirrosta sekä sähköverosta. Lisäksi laskettavassa tilanteessa voitaisiin huomioida sähkön liittymismaksu, joka riippuu liittymän koosta sekä sijainnista. Laskennassa käytetään sähkölle hintana kuvasta 10 otettua 18snt/kWh.



Kuva 10. Sähkön hinta kuluttajatyypeittäin. [15]

5.2 Laskenta

Laskennassa tarkastellaan eri vaihtoehtoja, kuinka laitteistoa olisi kannattavinta käyttää, sekä verrataan näiden kustannuksia perinteiseen hakelämmitykseen, jolloin sähkö ostettaisiin kokonaan. Puukaasulaitteiston osalta lasketaan kustannukset eri polttoaineita käytettäessä kahdella eri tavalla.

Ensin lasketaan kustannukset tilanteessa, jossa tuotetaan kaikki sähkö itse, tällöin tuotetaan lämpöä liikaa johtuen lämmön ja sähköntuotannon suhteesta.

Toisena laskenta perusteena pidetään tilannetta, jossa tuotetaan energiaa ai-noastaan sen verran, että lämmöntarve täyttyy ja loppu tarvittava sähköenergia ostetaan. Tällöin tuotanto on energiatehokkaampaa, eikä tuoteta ylimääräistä lämpöä.

Polttoaineen tarpeen laskeminen kokonaisenergiamäärän mukaan:

$$m = \frac{Q}{Q_{\text{puu}}} \quad (2)$$

jossa

m	puun määrä	[kg]
Q	energia	[kWh]
Q_{puu}	puun lämpöarvo	[kWh/kg]

$$\frac{20200 \text{ kWh/a}}{4,1 \text{ kWh/kg}} = 4926,8 \text{ kg/a}$$

Lasketulla polttoainemäärällä sähköntuotanto ei ole riittävää, jos ajatellaan tuotettavan kaikki sähkö itse. Sähköntuotanto lasketulla polttoainemäärällä:

$$Q_s = m * Q_{st} \quad (3)$$

jossa

Q_s	sähköenergia	[kWh]
m	puun määrä	[kg]
Q_{st}	sähköntuotto	[kWh/kg]

$$4927kg/a * 0,82kWh/kg = 4040kWh/a$$

Jotta sähkön tarve saadaan kokonaan täytettyä, tarvitaan polttoainetta:

$$\frac{6000kWh/a}{0,82kWh/kg} = 7317kg/a$$

Taulukko 6. Energian tuotto vuositasona

15300 kWh/a	Lämmitys
4200 kWh/a	Lämmin vesi
6000 kWh/a	Kotitaloussähkö
4500 kWh/a	Häviöt
30000 kWh/a	Yhteensä

Tällöin karkeasti laskettuna lämpöä tuotettaisiin enemmän kuin tarvittaisiin.

5.2.1 Energiantarve

Todellisuudessa laskentaa tulee suorittaa tarkemmin huomioiden eri vuodenajat. Tällöin lämpöä saatetaan tuottaa reilusti liikaa yritettäessä täyttää sähköntarve esimerkiksi kesällä, jolloin lämmöntarve on paljon pienempi.

Ajatellaan rakennuksen sijaitsevan säävyöhykkeellä 3, jolloin mitoittavana ulkolämpötilana käytetään -32°C . Tällöin ulkoilman keskilämpötila jakaantuu eri kuukausille taulukossa 7 esitetyllä tavalla.

Koska tutkittavan rakennuksen rakenteita ei tunneta, lasketaan tilojen lämmitykseen tarvittava energiamäärä kuukaudessa suoraan kuukauden pituuden sekä ulkolämpötilan mukaan.

$$\frac{\Delta T}{T_{usum}} \quad (4)$$

jossa	ΔT	Ulko- ja sisälämpötilan erotus	[°C]
	T_{usum}	Erotuksien summa	[°C]

$$\frac{(-8^{\circ}\text{C} - 21^{\circ}\text{C})}{210^{\circ}\text{C}} = 0,137$$

Kuukauden pituus koko vuodesta:

$$\frac{744h}{8760h} = 0,084$$

Näiden yhteisvaikutus

$$\frac{(0,084 + 0,137)}{2} * 10000kwh/a = 1112kWh$$

Taulukossa 7 esitetty sähkönkulutuksen jakautuminen on laskettu ympäristöministeriön ohjeen [18] mukaisilla arvoilla.

$$Q_t = Q_{ka} * P_k \quad (5)$$

jossa

Q_t	tammikuun sähköntarve	[kWh]
Q_{ka}	sähköntarpeen keskiarvo kk	[kWh]
P_k	painokerroin	

$$500kWh * 1,2 = 600kwh$$

Lämpimän käyttöveden energiantarve laskettu jakautumaan kuukauden pituuden mukaan:

$$\frac{htammikuu}{hvuosi} * Ql\ddot{a}mv \quad (6)$$

jossa

<i>htam</i>	tammikuun tunnit	[h]
<i>hvuosi</i>	vuoden tunnit	[h]
<i>Ql\ddot{a}mv</i>	energian tarve/a	[kWh]

$$\frac{744}{8760} * 4200kWh = 357kWh$$

Taulukko 7. Kohteen energiantarve kuukausittain

Kuukausi	Ulkoilman keskilämpötila °C [17]	Lämmitystarve (kWh) huomioiden ulkoilman lämpötilan sekä kuukauden pituuden	Sähkönkulutus kWh kuukausittaisten painokertoimien perusteella [18, s.71]	Lämmin käyttövesi kWh
Tammikuu	-8,0	1112	600	357
Helmikuu	-7,10	1050	600	322
Maaliskuu	-3,53	1006	550	357
Huhtikuu	2,42	852	450	345
Toukokuu	8,84	713	400	357
Kesäkuu	13,39	591	400	345
Heinäkuu	15,76	549	400	357
Elokuu	13,76	596	400	357
Syyskuu	9,18	691	450	345
Lokakuu	4,07	826	550	357
Marraskuu	-1,76	951	600	345
Joulukuu	-5,92	1063	600	357
Koko vuosi	3,42	10000	6000	4200

5.2.2 Polttoaineen kustannukset

Kun rakennukselle on saatu määritettyä kuukausien tarkkuudella tarvittava energiantarve, selvitetään todellinen polttoaineen tarve. Laskenta suoritetaan sähköntarpeen perusteella, sillä kyseisen laitteiston lämmöntuoton suhde sähköntuotantoon on sen verran suurempi, että lämmöntarve täyttyy. Sähköntarve lasketaan kaavan 2 mukaisesti käyttäen lämpöarvolle sähköntuoton osuutta. Energiantarve on muutettu kuukausikohtaiseksi, sekä sähköntuotto kWh/kg on polttoainekohtainen. Laskettuna käytettäessä puuta:

$$\frac{600kWh}{0,82kWh/kg} = 732kg$$

Tämän jälkeen tarkistetaan lämmöntarpeen täyttyvän kyseisellä polttoainemäärällä.

$$Q = H * m \quad (7)$$

jossa

<i>H</i>	<i>lämmöntuotto</i>	[kWh/kg]
<i>m</i>	<i>polttoaine</i>	[kg]
<i>Q</i>	<i>Lämmöntarve</i>	[kWh]

$$2,665kWh/kg * 732kg = 1950kWh$$

Tällöin lämpöä tuotetaan liikaa:

$$1950kWh - 1469kWh = 481kWh$$

Huomioiden laitteiston häviöt energiaa menee hukkaan:

$$732kg * 3,28kWh/kg - 1469kWh = 931kWh$$

Tammikuun kustannukset ovat

$$732kg * 4,1kWh/kg = 3000kWh = 3MWh$$

$$3MWh * 75€/MWh = 225€/tammikuu$$

Laskelmissa on ajateltu tuotettavan kaikki sähkö itse siten, että yleiseen sähköverkkoon ei tarvitsisi olla liittyneenä, jolloin välttyttäisiin turhilta maksuilta. Tällöin polttoainetta kuluu yli tarpeen ja syntyy hukkalämpöä. Sähköä ei myöskään ole saatavilla esimerkiksi laiterikon sattuessa, joka voisi olla ikävää tietyissä tilanteissa.

5.2.3 Hakelämmitys

Jotta itse tutkittavan laitteiston kannattavuudesta saadaan käsitys, verrataan kustannuksia myös perinteiseen hakelämmitykseen. Hakelämmityksessä käytetään hakekattilaa, minkä hyötysuhteena on 85%. Stokerin sähkönkulutusta ei huomioida, koska ajatellaan molempien laitteiden käyttöön kuluvan saman verran sähköä.

Lasketaan polttoaineen tarve huomioiden kattilan hyötysuhteen

$$m = \left(\frac{Ql + Qlv}{2,8kWh/kg} \right) / 0,85$$

$$\left(\frac{10000kWh + 4200kWh}{2,8kWh/kg} \right) / 0,85 = 5966kg/a$$

Tällöin hakkeen hinnaksi saadaan

$$\frac{5966kg}{320kg/im^3} * 20€/m^3 = 373€$$

Sähköhinta käytettäessä haketta:

$$6000kWh * 0,18€/kWh = 1080€$$

Vuosikustannukset

$$1080\text{€} + 373\text{€} = 1453\text{€/a}$$

5.2.4 Elinkaaritarkastelu

Kun valitaan kiinteistöön lämmitysjärjestelmää, tulee kustannuksia miettiä kuitenkin pidemmällä aikavälillä kuin pelkän tuotannon hinnan osalta. Kannattavuuden yhtenä suurimpana osana onkin laitteiston investointikustannus sekä käyttöikä. Hakejärjestelmän hankintakustannuksena voidaan pitää yleensä noin 10000-20000 euroa. Laskennassa hankintakustannuksena on käytetty 20000 €.

Ongelmana puunkaasutuslaitteiston osalta on sen kaupallinen saatavuus, sillä pienessä kokoluokassa ei laitteistoille oikein löydy valmistajaa. Tämän vuoksi hankintakustannuksen hinta kasvaa suureksi. Puukaasulaitteistoja valmistavan Volter Oy:n toimitusjohtajan mukaan: "haasteena on juurikin laitteiston hinta, sillä laitteiston koon pienentyessä, laitteiston kustannukset eivät skaalaudu oikeassa suhteessa alaspäin tehon laskiessa. Lisäksi ongelmaksi syntyisi laitteiston vaatimat huoltotyöt, joita keskiverto omakotiasukas ei ole juuri valmis tekemään. Karkeana hinta-arviona voitaisiin pitää 50000€." [16.]

5.3 Kannattavuus

Jos sähkön pientuottaja on yksityishenkilö, on arvonlisävero huomioitava talousvaikutuksissa. Tavallisesti pientaloasiakkaat maksavat korkeampaa ostosähkön hintaa kuin yritysasiakkaat. Tämän vuoksi oman tuotannon hyödyntäminen on kannattavampaa pientalotuottajille. Pientaloissa sähkönkulutuksen pohjakuorma on kuitenkin pienempää kuin yritysasteissa, jonka vuoksi tuotannon omakäyttöaste on alhaisempi kuin yrityksillä. Tämä vaikuttaa suuresti investoinnin kannattavuuteen pientuottajan kannalta. [5, s. 27.]

Parhaiten pien-CHP-ratkaisut soveltuvat kohteisiin, joissa on kohtalaisen suuri energiantarve. Pien-CHP-ratkaisun kannattavuus paranee, jos lämpöä voidaan hyödyntää mahdollisimman tehokkaasti. Pien-CHP-ratkaisujen kannattavuuteen vaikuttaa myös polttoaineiden saatavuus. Suurin osa hakkuutähteistä

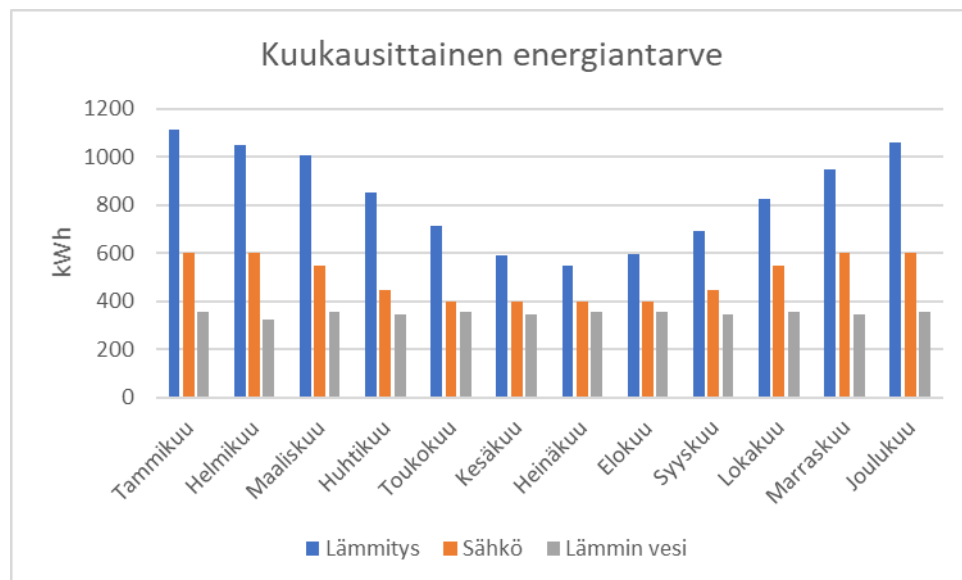
jää nykyisin hyödyntämättä, ja tulevaisuudessakin metsätähdettä tulee riittämään pien-CHP-käyttöön merkittäviä määriä. Suomessa biokaasun pien-CHP-potentiaali on merkittävä. [5, s.26.]

Käyttökokemukset pien-CHP-teknologioista ovat niin vähäiset, että tuotantokustannuksista on vaikea muodostaa luotettavaa kuvaa. Kustannuksien määrä vaihtelee riippuen teknologiasta, mutta kustannukset ovat kuitenkin korkeammat kuin suurella CHP-laitoksella. Pien-CHP-laitoksien kilpailukykyä vähentävät korkeat valmistamisen materiaalikustannukset sekä massatuotannon puute. [5, s. 13.]

6 TULOKSET JA TARKASTELU

6.1 Energian tarve

Kesäisin lämmöntarve jää reilusti pienemmäksi verrattuna talviin, jonka vuoksi laitteistoa ei kannattaisi käyttää sähköntarpeen perusteella. Tällöin kesäisin tuotettaisiin reilusti ylimääräistä lämpöä, joka ei ole energiatehokasta. Kuvassa 11 on esitetty energiantarpeen jakautuminen eri vuodenaikoina.



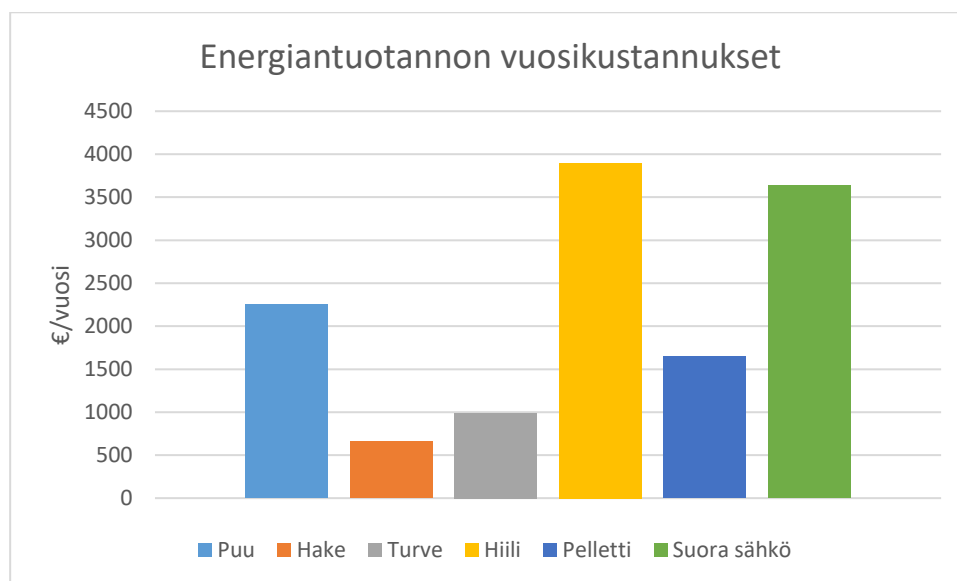
Kuva 11. Energiantarpeen jakautuminen.

6.2 Polttoaineen kustannukset

Pelkästään mietittäessä energiantuotannon kustannuksia voidaan siis todeta, että kaasutus voi olla kannattavaa tietyillä polttoaineilla, esimerkiksi hakkeella vuosikustannukset ovat 660€. Käytettäessä palaturvetta sekä haketta kaasutukseen jäävät energianhinnat pienemmäksi verrattuna hakelämmitykseen. Muiden polttoaineiden osalta kustannukset jäävät suuremmiksi.

6.2.1 Sähkön täysi tuotto

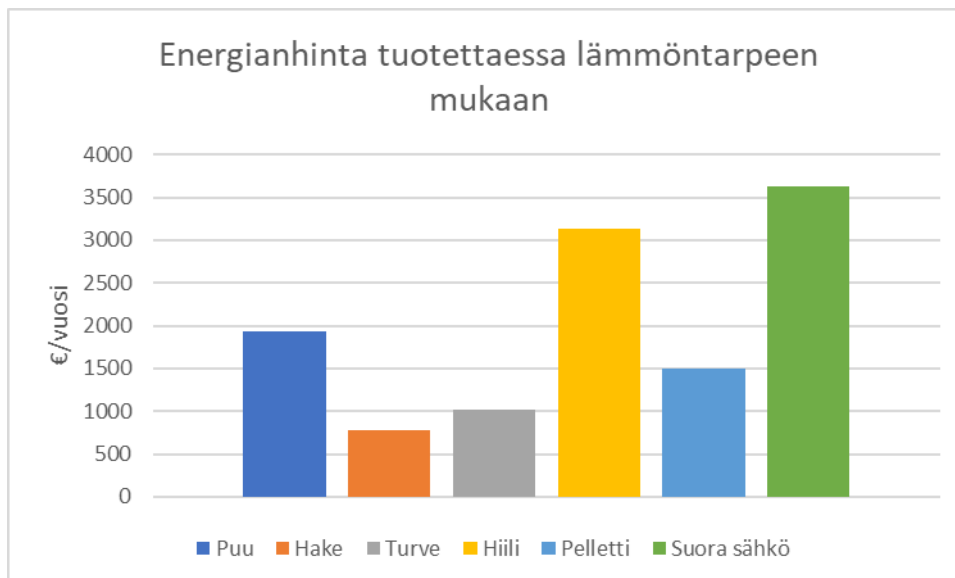
Koko vuoden kustannukset käytettäessä puuta ovat 2250€. Häviöiden sekä lämmöntuoton suhteen vuoksi käytettäessä puuta, syntyy hukkalämpöä 9800kWh vuodessa, minkä kustannus on 735€. Kuvassa 12 on esitetty energiantuotannon vuosikustannukset käytettäessä eri polttoaineita siten, että kaikki sähkö tuotetaan itse.



Kuva 12. Energiantuotannon kustannukset

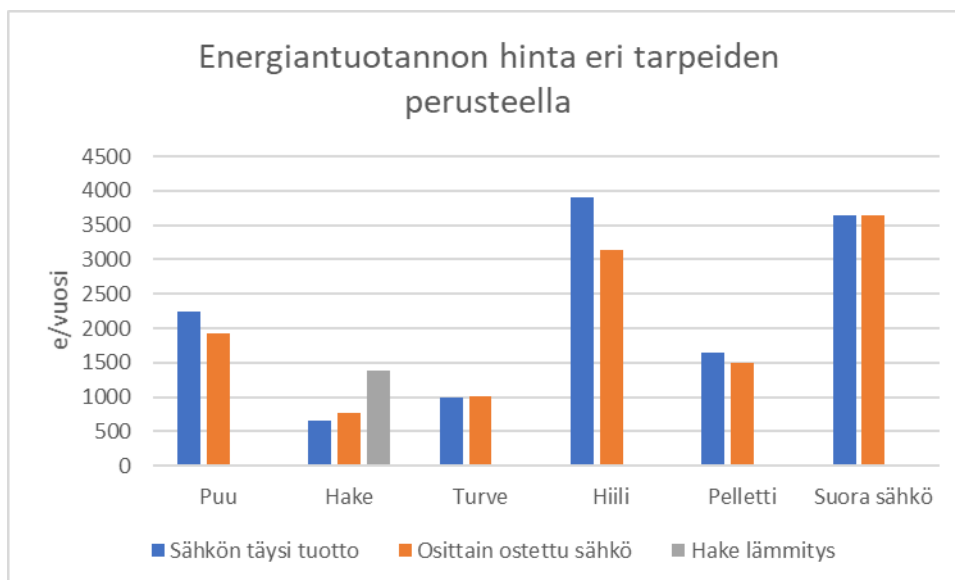
6.2.2 Sähkön osittainen tuotto

Jos ajatellaan laitteistolla tuotettavan energiaa lämmitystarpeen mukaan, olisi tällöin syntyvä sähkö vain ns. sivutuote, kannattavuus muuttuu hieman, sillä tuotettu sähkö ei olekaan enää niin arvokasta. Tällöin ei kuitenkaan olisi riskiä, että sähkönsaanti loppuu. Kuvassa 13 on esitetty vuodessa tuotettavan energian kustannukset eri polttoaineilla, kun laitteistoa ajetaan lämmitystarpeen perusteella ja osa sähköstä on ostettua.



Kuva 13. Energiantuotannon kustannukset

Tarkastelun perusteella voidaan todeta, että ostetuilla polttoaineillakin on arvoa, eikä niitä välttämättä kannata käyttää saavuttaakseen sähköntarpeen täyttä määrää, vaan kannattavampaa voi olla ostaa osa sähköstä, jolloin hukkalämpöä ei tarvitsisi tuottaa. Kuvassa 14 on esitetty energiantuotannon vuosikustannukset eri polttoaineille sekä tuotantoperusteille.



Kuva 14. Kustannukset eri tuotantoperusteilla

6.3 Järjestelmien elinkaaritarkastelu

Tarkastellessa järjestelmien kustannuksia 25 vuoden ajalla huomioiden sekä polttoaine-, sähkö- sekä laitteiden investointikustannukset, ei kaasutuslaitteisto enää kilpaile hakelämmityksen kanssa. Edullisimmalla energiantuottotavalla, eli kaasutuslaitteistolla tuottaessa kaikki sähkö itse, kun kustannuksiin huomioidaan investointi, tulee vuosikustannukseksi 2660€. Investointikustannuksen suuruudesta riippumatta on kaasutuslaitteiston käyttö esimerkiksi sähkölämmitystä edullisempaa. Vaikka tilannetta ajateltaisiin siten, että polttoainetta on saatavilla omasta takaa eikä siitä tarvitsisi maksaa, ei kaasutuslaitteisto ole edullisempi kuin hakelämmitys ja ostettu sähkö.

25 vuoden ajalla kaasutuslaitteisto olisi 3000€ kallimpi nykyisellä sähkönhinnalla kuin hakelämmitys, vaikka polttoaine olisi ilmaista. Ostetulla polttoaineella sähkönhinnan tulisi olla 0,26€/kWh tai enemmän, jotta kaasutus olisi hakelämmitystä kannattavampaa. Kaasutuslaitteiston kannattavuus verrattuna hakelämmitykseen kaatuukin siis sen suureen investointikustannukseen. Jotta kaasutuslaitteiston valinta olisi kannattavaa tuottaessa kaikki sähkö itse, tulisi investointikustannuksien olla noin 38 000€ tai vähemmän. Jos osa sähköstä ostettaisiin tulisi kaasutuslaitteiston hinnan olla noin 35 000€ tai vähemmän, jotta kaasutus olisi kannattavaa pidemmällä aikavälillä.

Laskennan perusteella voidaan todeta, että energiantuotanto puukaasutuslaitteistolla on edullista varsinkin hakkeella ja turpeella. Kaikilla polttoaineilla ei kuitenkaan kaasutus ole kannattavaa. Eri polttoaineiden välillä on myöskin eroja, kannattaisiko kaikki sähkö tuottaa itse vai ostaa osa siitä. Todellisuudessa ei kaikkea sähköä kannata tuottaa itse laskennassa käytetyllä sähköntuotannon hyötysuhteella. Vaikka polttoaine olisi ilmaiseksi saatavilla, ei ole ympäristönäkökulmasta kannattavaa tuottaa ylimääräistä lämpöä sähköntuotannon takia varsinkaan vuositasolla. Esimerkiksi tämän laskennan tilanteessa kaiken sähköntuottaminen tarkoittaisi jopa 2900kg lisäystä hakkeen tarpeeseen.

Laskelmissa ei ole huomioitu polttomoottorin huoltoon kuluvia kustannuksia, joten todellisuudessa kustannukset ovat hieman suuremmat. Taulukossa 8 on esitetty eri polttoaineiden vuosikustannukset.

Taulukko 8. Energiantuotannon vuosikustannukset kaasutuslaitteistolla

Polttoaine	Sähkön osittainen tuotto €/vuosi	Sähkön täysi tuotto €/vuosi
Puu	1932	2250
Hake	775	<u>660</u>
Turve	1015	990
Hiili	3134	3900
Pelletti	1495	1650
Sähkölämmitys	3636	3636

Taulukossa 9 on esitetty laitteistolle investointikustannukset, joiden alittuessa kaasutuslaitteiston käyttö olisi taloudellisesti kannattavaa 25 vuoden aikavälillä tarkasteltuna. Investointikustannuksia on tarkasteltu eri tilanteissa, kuten onko polttoaine ostettua vai ilmaista sekä tuotetaanko kaikki sähkö itse vai onko osa siitä ostettua. Mikäli investointikustannuksia ei olisi mahdollista pienentää alle 50000€, olisi kaasutuslaitteiston käyttö kannattavaa sähkönhinnan noustessa taulukossa esitettyjen hintojen suuruiseksi. Taulukon kustannukset on laskettu verraten hakelämmityksen kustannuksiin. Verrattuna esimerkiksi sähkölämmitykseen on kaasutus kannattavaa.

Taulukko 9. Investoinnin ja sähkönkustannukset, jotta kaasutus olisi kannattavaa.

Investoinnit / sähkönhinta	Sähkön täysi tuotto	Sähkön osittainen tuotto
Investointi, kun ostettu polttoaine €	38000	35000
Investointi, kun ilmainen polttoaine €	47000	39500
Sähkönhinta, kun ostettu polttoaine €/kWh	0,26	0,32
Sähkönhinta, kun ilmainen polttoaine €/kWh	0,2	0,28

7 PUUKAASUTUSLAITTEISTO OSANA KIINTEISTÖN LÄMMITYSJÄRJESTELMÄÄ

Harkittaessa kaasutuslaitteiston kytkemistä kiinteistöön tulisi ensin hieman pohtia sen toteutusta. Laitteistolla on sen verran kokoa, että se vaatisi oman tilan. Laitteiston käytöstä syntyy myös melua sekä tärinää, kuten normaalisti-kin polttomoottorin käymisestä. Viisain tapa olisikin sijoittaa laitteisto kiinteis-
tön ulkopuolelle erilliseen rakennukseen tai ns. konttiin. Lämpö siis johdettai-
siin lämpökanaalia pitkin rakennuksen sisään. Lämpö tulisi myös siirtää poltto-
moottorin jäähdytysjärjestelmästä kiinteistön lämmitysjärjestelmän kierto-
lämmönsiirtimen avulla, sillä polttomoottorissa on syytä käyttää eri nestettä
kuin lämmitysjärjestelmässä sekä esimerkiksi vuodon syntyessä polttomootto-
riin tyhjentyisi koko lämmitysjärjestelmä. Polttomoottorin omalla kierrolla eli ns.
ensiöpuolella tulisi olla myös erillinen lauhdutin. Laitteistoa ajettaessa tietyissä
jaksoissa esimerkiksi kaasutettaessa kokonainen pesällinen polttoainetta tuo-
tetaan sähköä ja lämpöä koko ajan, vaikka esimerkiksi lämmölle ei olisi enem-
pää tarvetta. Kun varaaja on lämmitetty täyteen kapasiteettiinsa, saattaa siis
lämmöntuotanto edelleen jatkua, jolloin lämpö olisi luovutettava johonkin, jottei
polttomoottori ylikuumene. Tällöin lämpö on lauhdutettava johonkin muuhun
kohteeseen, kuten ulkoilmaan lauhduttimen avulla.



Kuva 15. Gasek R5 CHP 50 kW [24]

Kuvassa 15 esitetty Gasek Oy:n valmis ratkaisu, jossa automatisoitu laitteisto on sijoitettuna konttiin. Kuvan tuote on Gasek R5 CHP 50 kW, joka kuitenkin on teholtaan liian suuri pientalon tarpeisiin.

7.1 Riskit

7.1.1 Häkämyrkytys

Hiilimonoksidin tuottamisessa suljetuissa tiloissa on omat riskinsä, sillä sitä on mahdotonta havaita ihmisen aisteilla, ennen myrkytysoireiden alkamista. Tämä johtuu siitä, että kaasu on hajuton, väritön sekä ärsyttämätön. Altistuksessa hiilimonoksidille sitoutuu häkä hemoglobiiniin hapen sijasta. Altistumisen seurauksena hiilimonoksidi heikentää sydänlihaksen toimintaa sekä aiheuttaa verenpaineen laskua. Myrkytyksen ensioire on päänsärky. Altistumisen jatkuessa esiintyy heikkoutta, huimausta, sekavuutta, pahoinvointia sekä oksentelua. Hiilimonoksidin syrjäytettyä yli puolet hemoglobiinin hapesta johtaa häkämyrkytys hengitys- ja sydänpysähdykseen. [26, s. 318.]

Hiilimonoksidin vaarallisuus on myös yksi syy, minkä vuoksi laitteistoa ei kannattaisi sijoittaa kiinteistön sisään, siten että kaasulle olisi mahdollisuus altistua. Tämän vuoksi ulos sijoitettava konttiratkaisu olisi myös turvallinen esimerkiksi vuodon sattuessa laitteistoon. Konttikin tulisi varustaa häkävaroittimella, jottei kaasulle altistuisi siellä käydessä. Turvatoimena tulisikin laitteisto automatisoida sammumaan häkäpitoisuuden kasvaessa tilassa liian suureksi.

7.1.2 Toimintavarmuus

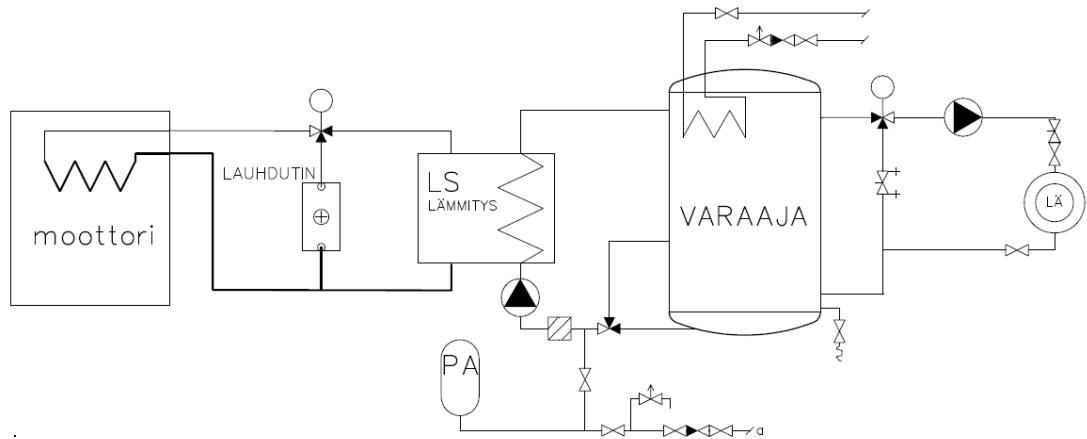
Käytettäessä laitteistoa kaiken sähkön tuottamiseen ilman sähköliittymää on aina riskinä sähkön saannin päättyminen esimerkiksi laiterikon sattuessa. Lisäksi laitteisto tarvitsee käynnistyäkseen sähköä, jota kylläkin on saatavilla polttomoottorin omalta akulta. Laitteiston käyttöä helpottaisi sen varustaminen akustolla, mutta tämä lisäisi sen kustannuksia. Riippuen generaattorista jouduttaisiin laitteisto varustamaan invertterillä, jotta akustoa olisi mahdollista hyödyntää. Hyvä ratkaisu toimintavarmuuden lisäämiseksi voisi olla laitteiston varustaminen valmiilla UPS-järjestelmällä, jotta sähkön saanti ei keskeytyisi lyhyillä huoltokatkoilla. UPS-järjestelmän käytössä hyvänä puolena olisi myös

tuotetun sähkön "laadun" parantaminen syötettäessä sähköä kiinteistön verkkoon.

7.2 Varaaja

Kaasutuslaitteistoa on vaikea käyttää lyhyissä jaksoissa esimerkiksi lämmöntarpeen noustessa. Lisäksi käytettäessä laitteistoa halutaan tuottaa sähköä mahdollisimman paljon, jotta mahdollisen ostosähkön määrää saadaan laskettua. Laitteistoa käynnistyksestä kuluu noin 5-10 minuuttia, jotta kaasua tuotetaan riittävästi moottorin käyttämiseksi. Tämän vuoksi lämmitysjärjestelmä tulisi varustaa varaajalla. Käytettäessä varaajaa saadaan tuotettu lämpöenergia säilöttyä, vaikka kaikkea energiaa ei kyseisellä hetkellä tarvittaisikaan. Varaajan lämpöenergiaa voidaan purkaa tilojen sekä käyttöveden lämmittämiseen, vaikka kaasutuslaitteisto ei olisi käynnissä. Varaajan avulla saadaan myöskin laitteiston energiatehokkuutta parannettua, sillä mahdollisesti tuotettua ylimääräistä lämpöenergiaa ei jouduta lauhduttamaan esimerkiksi ulkoilmaan ainakaan suurina määrinä. Usein varaajat mitoitetaan siten, että lämpöenergiaa riittää useiksi päiviksi, jottei jouduttaisi lämmittämään joka päivä. Kaasutuslaitteistoa käytettäessä voidaan mitoittaa varaaja hieman pienemmäksi kuin normaalisti, sillä sähköä halutaan tuottaa päivittäin, paitsi jos järjestelmä on varustettu riittävän suurella akustolla.

Laitteisto tulisi varustaa lämmönsiirtimellä, jotta järjestelmä olisi käytövarmempi. Polttomoottorilla tulisi käyttää siihen tarkoitettua jäähdytysnestettä, koska nesteellä voi olla jäätymisriski kulkiessaan lauhduttimelle. Oikein valittu jäähdytysneste vähentää myös moottorin osien syöpymistä. Jäähdytinnesteellä on myös korkeampi kiehumispiste kuin vedellä, minkä vuoksi moottoria voidaan käyttää korkeammassa lämpötilassa moottorin hyötysuhteen parantamiseksi. Laitteiston käytöstä lämpöhäviöitä syntyy muualtakin kuin polttomoottorista, kuten kaasuttimen vaipan lävitse, mutta lämpöä olisi mahdollista kerätä esimerkiksi tilan ilmanvaihdon avulla. Moottorin pakokaasutkin sisältävät lämpöenergiaa, mutta nekin ovat tarvittaessa osittain talteenotettavissa. Kuvassa 16 on esitetty lämmitysjärjestelmän kytkennän periaatekuva polttomoottorille.



Kuva 16. Periaatekuva

8 POHDINTA

Kaasutuslaitteiston käyttöä pientalon energiantuotanto ei vielä voida pitää yleisesti kannattavana ratkaisuna, jos verrataan esimerkiksi hakelämitykseen. Pienen kokoluokan laitteistoa ei löydy markkinoilta, minkä vuoksi ostettuna laitteiston hinta nousee korkeaksi massatuotannon puutteen takia. Kuitenkin verrattuna esimerkiksi maalämpöön kaasutuslaitteiston käyttö voi olla kannattavampaa. Erona kuitenkin on käytön huolettomuus. Kaasutuslaitteiston käyttöä on vaikea automatisoida täysin johtuen mm. suodattimien puhdistustarpeesta. Käytön huolettomuudella onkin suuri arvo laitteiston osalta. Tämä laskee ainakin omasta mielestäni laitteiston kannattavuutta yleisesti. Laitteiston käyttö tuskin koskaan tulee yleistymään ainakaan suuressa määrin, koska sen käyttö vaatii hieman tuntemusta sekä vaivaa, mutta toisaalta vaatii puulämmityskin oman vaivansa.

Pientalon kokoluokassa laitteiston hankkiminen ei vielä ole kannattavaa, mutta teollisuudessa tekniikan käyttö on jo yleistynyt jonkin verran. Sähköliittymän koon kasvaessa kasvaa suoraan sähkön kokonaishintakin, jolloin myös laitteiston käyttö olisi kannattavampaa kuluttajalle.

Laitteiston osalta kannattavuutta voitaisiin myös helposti kasvattaa paremman hyötysuhteen omaavalla polttomoottorilla. Jos polttomoottorina käytettäisiin kaasukäyttöiseksi suunniteltua moottoria, saataisiin sähköntuotantoa

kasvatettua, jolloin kaiken sähkön tuottamisesta ei syntyisi suuria määriä hukkalämpöä. Sähköntuotannon hyötysuhteen kasvu ei kuitenkaan tekisi laitteiston käytöstä niin paljoa kannattavampaa, että pientalokokoluokassa tämä olisi siltikään erityisen kannattavaa, sillä vaikka sähköä tuotettaisiin liikaa ja myytäisiin yleiseen verkkoon, sähköstä ei maksettaisi samaa hintaa kuin verkosta ostetusta.

Sähkönhinnan jatkuvan nousun vuoksi saattaa laitteiston valinta nousta tulevaisuudessa kannattavaksi. Kuten työssä on laskettukin, sähkönhinnan noustessa hintaan 0,2€/kWh olisi 25 vuoden aikavälillä tarkasteltuna kaasutuslaitteiston käyttö kannattavaa huolimatta suuresta investointikustannuksesta. Sähkönhinnan voi olettaa nousevan tulevaisuudessa sen tarpeen kasvaessa jatkuvasti. Esimerkiksi liikennepolttoaineista syntyvät verotulot valtiolle on noin 2,6 miljardia euroa vuodessa. Näiden verotulojen päättyessä ja energian oston siirtyessä fossiilisten polttoaineiden sijasta sähköön voisi olettaa sähkönhinnan kasvavan.

Pohtiessa laitteiston kannattavuutta hieman laajemmin, kuten vaikka EU:n sisällä, voisi laitteiston käyttö olla joissakin maissa hyvinkin kannattavaa. Vaikka toisin voisi olettaa, on Suomessa sähkönhinta aika lailla keskivaiheilla muihin Euroopan maihin verrattuna. Esimerkiksi Saksassa sähkön kokonaishinta kuluttajille on jopa 0,3€/kWh, mikä tekisi kaasutuslaitteiston käytöstä hyvinkin kannattavaa. Toisaalta polttoainetta tuskin on monessakaan muussa maassa samalla lailla saatavilla kuin Suomessa, sekä polttoaineiden hinnat voi olla täysin eri luokkaa. Mutta jos polttoainetta on vaikka saatavilla omasta takaa, voisi esimerkiksi Saksassa säästää paljonkin energianhankinnassa.

Työn aikana minulle heräsi eräänlainen visio, kuinka laitteiston käytön kannattavuutta voisi kasvattaa. Tämän toteutus tai käyttö ei kuitenkaan ole ihan realistinen sen käytön hankaluuden vuoksi. Taloudellista kannattavuutta saisi kasvatettua ratkaisulla, jossa yksi puukaasutin palvelisi kiinteistöä sekä ajoneuvoa. Puukaasutin olisi sijoitettuna ajoneuvoon, jolla tuotettaisiin kaasua ajoneuvon polttomoottorille. Saapuessa kotiin ajettaisiin ajoneuvo ns. telakalle, jossa ajoneuvon polttomoottori kytkettäisiin kampiakselilta suoraan generaattoriin sekä polttomoottorin jäähdytysjärjestelmä kytkettäisiin pikaliittimin

kiinteistön lämmitysjärjestelmään. Tällöin saataisiin kaasutinlaitteiston arvolle enemmän vastinetta. Vastaavan systeemin käyttö ei olisi helppoa, ja ongelmia syntyisi mm. sähkön saannin päättymisestä poistuessa ajoneuvolla jos kiinteistöä ei olisi kytketty sähköverkkoon. Tämä ei ole mikään realistinen idea mutta hauska ajatus.

Yhteenvedona kaasutuslaitteistosta voidaan todeta, että laitteiston hankinta ei ole kannattavaa pientaloon nykyisellä sähkönhinnalla ja laitteiston investointikustannuksella. Kuitenkin tulevaisuudessa sähkönhinnan noustessa tarpeeksi laitteiston hankinta olisi kannattavaa. Sähkönhinnan noustessa kiinnostus omaan sähkötuotantoon ja sitä myöten mahdollisesti myös puukaasutukseen kasvaa. Myös omavaraisuudesta haaveileville laitteisto olisi hyvä ratkaisu. Laitteiston käyttö olisi kannattavampaa isommilla energiantarpeilla, ja uskoisin laitteiston olevan kannattavaa esimerkiksi maatiloilla. Laitteisto ei sovi haja-asutusalueille, mutta mikäli kiinteistö sijaitsee syrjässä, saattaa sähköliittymän hinta kasvaa kohtuuttoman suureksi, jolloin kaasutuslaitteisto voisi olla kannattava vaihtoehto. Laitteisto myös vaatii jonkin verran huoltoa, eli myös hie- man osaamista, minkä vuoksi laitteisto tuskin sopisi kaikille kuluttajille.

Lisätutkimusta aiheeseen liittyen voisi suorittaa esimerkiksi mittauksilla ole- massa olevasta laitteistosta. Mittauksilla saataisiin selvitettyä todelliset ener- giantuotannon määrät sekä kustannukset. Lisäksi voitaisiin laitteiston automa- tisoinnin mahdollisuuksia selvittää, että kuinka helppokäyttöiseksi laitteiston pystyy toteuttamaan. Kustannuksien osalta olisi myös oleellista tietää, että jos jokin yritys alkaisi massatuottamaan laitteistoa niin millä kustannuksilla laitteisto olisi hankittavissa ja päästäisiinkö kustannuksissa riittävän alas kan- nattavuuden saavuttamiseksi. Aineiston osalta olisi myös hyvä olla jostakin saatavilla kattava lista aiheeseen liittyvästä kirjallisuudesta, sillä suurin osa kyseisen tekniikan kirjallisuudesta on julkaistu jopa 1940-1980-luvulla ja on vaikeasti saatavilla. Tällöin kaasutuksesta kiinnostuneiden olisi helpompaa tu- tustua aiheeseen ja tehtyihin tutkimuksiin.

LÄHTEET

1. Harju, P. Lämmitystekniikan oppikirja, oppilaan kirja. Penan Tieto-Opus Ky. 2002.
2. Köhler, S. Puukaasun aika. Helsinki: Alfamer. 2007.
3. Knoef, H. Handbook Biomass Gasification. The Netherlands: BTG biomass technology group. 2005.
4. Suomen virallinen tilasto (SVT). Asumisen energiankulutus. WWW-dokumentti. ISSN=2323-3273. 2018. Helsinki: Tilastokeskus. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/asen/2018/asen_2018_2019-11-21_tie_001_fi.html [viitattu 21.11.2020].
5. Pesola, A. Vanhanen, J. Hagström, M. Karttunen, V. Larvus, L. Hakala, L & Vehviläinen, I. Sähkön pientuotannon kilpailukyvyyn ja kokonaistaloudellisten hyötyjen analyysi. Loppuraportti. Gaia Consulting Oy. 2014. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.motiva.fi/fi-les/9439/Sahkon_pientuotannon_kilpailukyvyyn_ja_kokonaistaloudellisten_hyotyjen_analyysi_Loppuraportti.pdf [viitattu 20.12.2020].
6. Motiva. Opas sähkön pientuottajalle. Sähkön pientuotanto. 2012. WWW-sivusto. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/sahkon_pientuotanto [viitattu 20.12.2020].
7. Mikkonen, V. Ajoneuvoon asennettavan puukaasuttimen rakennusohjeet. Omakustanne. 2008.
8. Motiva. Moottoritekniikka. Bensiinimoottori. WWW-sivusto. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_viisaasti/valitse_auto_viisaasti/ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka/bensiinimoottori [viitattu 10.2.2021].
9. Perttula, J. Energiatekniikka. Porvoo: WS Bookwell Oy. 2000.
10. Motiva. 2020. Uusiutuva energia. Biopolttoaineiden lämpöarvoja. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/bioenergia/tietolahteita/biopolttoaineiden_lampoarvoja [viitattu 13.1.2021].
11. Halkoliiteri. Polttopuun ominaisuudet. WWW-sivusto. Saatavissa: <http://www.halkoliiteri.com/?id=587> [viitattu 14.1.2021].
12. Ahoranta, J. Sähkötekniikka, Sanoma pro Oy, Helsinki, 2015.
13. Terveystieteiden tutkimuskeskus. Ympäristöterveys. Puunpoltto. 2020. WWW-sivusto. Saatavissa: <https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/ilman-saasteet/puunpoltto> [viitattu 19.1.2021].

14. Ympäristö. Rakentaminen. Energiatehokkuus. Pientalon energiankulutus ja päästöt. WWW-sivusto. Saatavissa: https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Rakentaminen/Korjaustieto/Pientalot/Energiatehokkuus/Energiatehokas_pientalo/Energiankulutus [viitattu 19.1.2021].
15. Tilasto: Energianhinnat. WWW-dokumentti. ISSN=17799-7984. 3. Vuosineljännes 2020, Liitekuvio 5. Sähkönhinta kuluttajatyypeittäin. Helsinki: Tilastokeskus. Saatavissa: https://www.stat.fi/til/ehi/2020/03/ehi_2020_03_2020-12-10_kuv_005_fi.html [viitattu 21.1.2021].
16. Haapakoski, J. Toimitusjohtaja. Sähköpostikeskustelu 11.2.2021. Volter Oy.
17. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta. Huonelämpötilan hallinnan suunnittelussa käytettävät säätiedot. 2017. PDF-tiedosto. Saatavissa: https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Julkaistu-sisailmasto-2017-AAD7DB92_F571_4766_A3F1_BFF63383191B-133875.pdf/fb05e727-5b27-6a6f-1c27-0ee7d941345e/Julkaistu-sisailmasto-2017-AAD7DB92_F571_4766_A3F1_BFF63383191B-133875.pdf?t=1603260102828 [viitattu 21.3.2021].
18. Suomenrakentamismääräyskokoelma. Energiatehokkuus. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. 2017. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Ohje---Rakennuksen-energiankulutuksen-ja-lammitystehontarpeen-laskenta-20-12-2017-4332AA81_75E1_4CA0_B208_B0ACB60A267F-133692.pdf/277c79e7-2a12-5052-ba33-cb2e2c8709ab/Ohje---Rakennuksen-energiankulutuksen-ja-lammitystehontarpeen-laskenta-20-12-2017-4332AA81_75E1_4CA0_B208_B0ACB60A267F-133692.pdf?t=1603260201597 [viitattu 28.1.2021].
19. Vapo Oy. Palaturve. WWW-sivusto. Saatavissa: <https://kauppa.vapo.fi/tuotteet/palaturve/> [viitattu 25.2.2021].
20. Wisago Oy. PUUTA-esiselvityshanke. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.utajarvi.fi/tiedostot/kehittamispalvelut/PUUTA-hanke/PUUTA-hanke_raaka-aineen_kasittely_ ja_jalostus_puunjalostuskeskuksessa_Wisago_Oy_15092015.pdf [viitattu 25.2.2021].
21. Suomen Kotteria Oy. Lämmityshiilet. WWW-sivusto. Saatavissa: <https://kottaria.com/hiilet/lammitushiilet/> [viitattu 25.2.2021].
22. Volter Oy. Technology. WWW-sivusto. Saatavissa: <https://volter.fi/technology/> [viitattu 25.2.2021].

23. Hellgren, M. Heikkinen, L. Suomalainen, L. & Kala, J. Energia ja ympäristö. Opetushallitus. Hakapaino Oy. Helsinki. 1999.
24. Gasek Oy. Technology. Wood gasification. WWW-sivusto. Saatavissa: <http://www.gasek.fi/> [viitattu 8.3.2021].
25. Hanzel electric motor. Sähkögeneraattorit. Verkkosivusto. Saatavissa: <http://fi.hanzelmotor.org/asynchronous-motor/ms-aluminum-motor/aluminum-housing-4kw-b3-electric-generator.html> [viitattu 9.3.2021].
26. Castren, M. Helveranta, K. Kinnunen, A. Korte, H. Laurila, K. Paakkonen, H. Pousi, J. & Väisänen, O. Ensihoidon perusteet. Otavan kirjapaino Oy. Keuruu 2012. Pelastusopisto. Suomen Punainen Risti.
27. Vapo Oy. Pelletit. WWW-sivusto. Saatavissa: <https://kauppa.vapo.fi/tuotteet/500-kg-pellettisakki/> [viitattu 18.3.2021].
28. Halkoliiteri. Polttopuun ja bioklapin hintavertailu. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://bioklapi.fi/files/Liitteet/Polttopuu-Briketti%20%20rev8.pdf> [viitattu 18.3.2021].