



# Energiankulutus sähkön ja polttoaineiden tuotannossa

Energianlähteiden hyötysuhteet muunnettuna käytettävään muotoon ja ajoneuvon liike-energiaan

Oliver Ekberg

OPINNÄYTETYÖ

Toukokuu 2021

Sähkö- ja automaatiotekniikka  
Sähkövoimatekniikka

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Sähkö- ja automaatiotekniikan insinööritutkinto  
Sähkövoimatekniikka

EKBERG, OLIVER:

Energiankulutus sähkön ja polttoaineiden tuotannossa  
Energianlähteiden hyötysuhteet muunnettuna käytettävään muotoon ja ajoneu-  
von liike-energiaan

Opinnäytetyö 53 sivua  
Huhtikuu 2021

---

Opinnäytetyössä käsitellään energianlähteiden tuotantoketjuun kuluvan energian sekä hukkaenergian määrää, kun ne valmistetaan tuotteeksi tai muunnetaan sähköenergiaksi. Työssä tutkitaan lisäksi, kuinka paljon niistä saadaan ajoneuvon liike-energiaa ja paljonko koko elinkaari aiheuttaa hiilidioksidipäästöjä. Aihe otettiin tutkittavaksi, koska aihetta käsittelevää kirjallisuutta on vähän ja yleisessä keskustelussa energianlähteitä verrataan toisiinsa yksipuolisesti. Työssä oli tarkoitus saada kokonaisvaltainen kuva eri energiantuotantomenetelmien vaihteista energiahävikeistä, missä käytettiin aineiden kokonaishyötysuhdetta, eli aineeseen kulutetun ja siitä saatavan energian suhdetta, kuvaavana tekijänä. Tutkittaviksi energianlähteiksi valittiin yleisimmät raaka-aineet, jotka jaettiin polttoaine- sekä sähköntuotantomenetelmiin. Energianlähteiksi otettiin myös uusiutuvia energianlähteitä.

Opinnäytetyössä selvisi, että sähköntuotantomenetelmien suurimpia heikkouksia ovat voimaloiden hyötysuhteet ja niiden mahdolliset päästöt sekä raaka-aineiden valmistelut päästöineen. Ajoneuvotarkastelussa todetaan polttoainetta käyttävän ajoneuvon olevan hyötysuhteeltaan selkeästi heikompi kuin vastaavan sähkökäyttöisen. Sähkövoimaloiden hyötysuhteet kuitenkin laskivat sähköajoneuvojen kokonaishyötysuhdetta. Raaka-aineen energiasta noin 20–30 % saatiin käytettyä liike-energiaan, lukuun ottamatta vesivoimaa. Kun koko raaka-aineen valmisteluketju otettiin huomioon ajoneuvokäyttöineen, osoittautuivat hiilidioksidipäästöt fossiilisten sähköntuotantomenetelmien osalta korkeiksi. Tämä vahvistaa sähköajoneuvojen päästöjen olevan riippuvaisia tuotantomenetelmästä ja voimassa käytettävän raaka-aineen kiertokulusta.

Energiankulutus raaka-aineiden valmisteluissa on suhteellisen pientä, mutta kulutuksen merkittävyys kasvaa mitä enemmän energiaa muunnetaan. Lämpöenergiaa ei saada muunnettua täysin sähköksi voimaloissa, jolloin esimerkiksi sähköllä lämmittäminen on hyötysuhteeltaan heikkoa, kun verrataan raaka-aineen polttamista suoraan lämpöenergiaksi. Liike-energiaan olisi energiatehokkaampaa käyttää tuotantotapaa, jossa on parhain hyötysuhde raaka-aineesta liike-energiaan. Tutkielmaa rajoitti eniten perustelematon tiedonsaanti käytettävissä olleista lähteistä, mikä teki tuloksista totuuden sijaan suuntaa antavia. Lähteisiin perustuvaa laskemista tehtiin lopulta yhdestä energianlähteestä ja muut tulokset saatiin tutkimuksista, joissa tulokset olivat valmiiksi laskettuja.

---

Asiasanat: energiantuotanto, energiankulutus, energianlähde, hyötysuhde

## ABSTRACT

Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Electrical and Automation Engineering  
Power Engineering

EKBERG, OLIVER:

Energy consumption in production of electricity and other fuels  
Efficiencies of energy sources converted into the form used and the kinetic energy of the vehicle

Bachelor's thesis 53 pages  
April 2021

---

The thesis investigates the amount of energy consumed and wasted during the production chain of different energy sources when they are manufactured into a product or converted into electrical energy. Furthermore, the work examines how much of a crude material's energy is finally used to vehicle's kinetic energy. Carbon dioxide emissions caused by the crude materials entire life cycle are also examined. The topic was chosen because there is only a little literature on the subject and because energy resources are compared unilaterally in general discussion. The study intended to obtain a comprehensive picture of the phased energy losses of different energy production methods. The overall efficiency of the substances was used as a describing factor. The most common crude materials were selected as the examined energy sources. The selected crude materials were separated into fuel and electricity production methods. Renewable sources were also considered.

The thesis discovers that the biggest weaknesses of the electricity generation methods are the efficiencies of power plants and the emissions they may produce as well as the preparation of crude materials with their emissions. The vehicle inspection finds that a fuel-powered vehicle is clearly more inefficient than a similar electric vehicle. However, the efficiencies of the power plants decreased the overall efficiency of electric vehicles. About 20-30 % of the energy of crude materials was finally used as kinetic energy, except for hydro power. When the overall production chain of crude material was considered with vehicle usages, CO<sub>2</sub> emissions proved to be high for fossil power generation methods. This confirms that emissions from electric vehicles depend on the production method and the circulation of the crude material used in the power plant.

Energy consumption in the preparation of raw materials is relatively small but the significance of consumption increases as more energy is converted. Thermal energy cannot completely be converted into electricity at power plants which makes the efficiency of electric heating weak when compared to burning a crude material straight into heat energy. For kinetic energy, it would be more energy-efficient to use a production method with the best efficiency from crude material to the kinetic energy. This research was most limited by unjustified information from the available sources which made the results more indicative rather than truthful. Source-based calculations were eventually made from a single energy source and other results were obtained from research papers in which the results were pre-calculated.

---

Keywords: Energy production, energy consumption, energy resources, efficiency

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	TYÖN KUVAUS JA MÄÄRITTELY .....	10
3	POLTTOAINEET .....	11
	3.1 Diesel ja bensiini .....	11
	3.2 Maakaasu .....	12
	3.3 Biokaasu .....	13
4	SÄHKÖNTUOTANTO .....	15
	4.1 Hiilivoima .....	15
	4.2 Ydinvoima .....	16
	4.3 Tuuli- ja vesivoima .....	18
	4.4 Vety .....	19
	4.5 Maa- ja biokaasu .....	21
	4.6 Puu .....	21
5	POLTTOAINEIDEN HYÖTYSUHDE .....	23
	5.1 Bensiini ja diesel .....	23
	5.1.1 Öljykenttä .....	24
	5.1.2 Raakaöljyn kuljetus .....	26
	5.1.3 Raakaöljyn jalostus .....	28
	5.1.4 Bensiinin ja dieselin kuljetus .....	29
	5.1.5 Hyötysuhteet .....	29
	5.2 Maa- ja biokaasu .....	30
6	SÄHKÖNTUOTANTOMENETELMIEN KOKONAISHYÖTYSUHDE ...	32
	6.1 Hiilivoima .....	32
	6.2 Ydinvoima .....	34
	6.3 Tuuli- ja vesivoima .....	35
	6.4 Vety .....	36
	6.5 Maa- ja biokaasu .....	36
7	TULOKSET .....	38
	7.1 Raaka-aineesta valmiiksi energiaksi .....	38
	7.2 Aineesta ajoneuvon liike-energiaan .....	40
	7.3 Päästötarkastelu .....	44
8	POHDINTA .....	47
	LÄHTEET .....	50

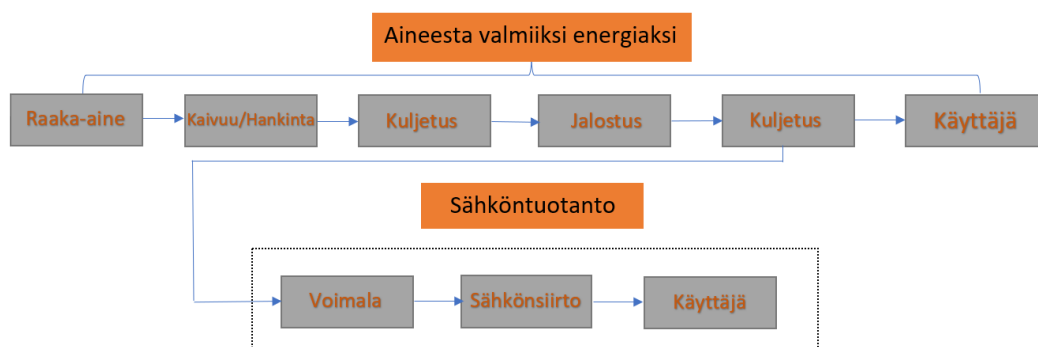
## LYHENTEET JA TERMIT

CCPP	Yhdistetty syklivoimala
CHP	Yhdistetty lämmön- ja sähköntuotantovoimala
CNG	Paineistettu maakaasu (compressed natural gas)
LNG	Nestemäinen maakaasu (liquid natural gas)
PEF	Energiakerroin k, (Primary energy factor)
WTT	Raaka-aineesta käytettävään muotoon, %, gCO <sub>2</sub> /kg, MJ/kg (Well to tank)
WTW	Raaka-aineesta liike-energiaan, %, CO <sub>2</sub> /km, MJ/kg (Well to wheel)
b	Barreli, 159 l
<i>E</i>	Energia, J, Wh
<i>P</i>	Teho, W
<i>q</i> <sub>CO<sub>2</sub></sub>	Hiilidioksidi, gCO <sub>2</sub>
<i>s</i>	Matka, km
<i>t</i>	Aika s, min, h, d, y
<i>V</i>	Tilavuus, l, b
<i>v</i>	Nopeus, mpk/h, km/h
<i>w</i>	Aineen ominaisenergia, Wh/kg, Wh/l, MJ/kg, MJ/l
$\eta$	Hyötysuhde, %
$\eta_{valm}$	Raaka-aineen valmisteluhyötysuhde, %
$\eta_{voimala}$	Voimalan hyötysuhde, %
$\eta_{siirtohäviö}$	Sähkönsiirtohäviöiden hyötysuhde, %
$\eta_{kok}$	Energianlähteen kokonaishyötysuhde, %
$\eta_{ajoneuvo}$	Ajoneuvon hyötysuhde, %
$\eta_{a-l-e}$	Aine-liike-energiahyötysuhde, %
$\rho$	Tiheys, kg/dm <sup>3</sup>

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyössä selvitetään energialähteiden kulkua raaka-aineesta asti käyttäjille saakka ja sitä, kuinka paljon energiaa niihin kuluu elinkaarensa aikana. Työn tavoitteena on tutkia, kuinka energiatehokkaasti eri raaka-aineet ovat tuotettavissa ja siirrettävissä käyttöpisteelle. Tuloksena saadaan energiankulutus tuotettua yksikköä kohti suhteessa siitä saatavaan energiaan, joten tekijänä käytetään hyötysuhdetta. Saatuja tuloksia sovelletaan vielä ajoneuvojen kanssa sekä huomioidaan energialähteiden elinkaaren aikaiset hiilidioksidipäästöt ajettua matkaa kohden. Raaka-aineena voi olla maasta saatava raaka-aine tai luonnosta saatava uusiutuva energia.

Raaka-aineille on tyypillistä muuntaa ne liike-energiaksi tai lämmöksi käytettävissä paikassa kuten moottorissa tai lämpökattilassa. Jokaisella raaka-aineella se ei ole mahdollista tai niiden käyttötarkoituksena on polttaa ne voimaloissa, joissa tuotetaan lämpöä, sähköä tai molempia. Energianmuunnosta ennen aineet voivat vaatia jalostusta, kaivuuta tai pumppausta, josta ne siirretään prosessoitaviksi. Tämän jälkeen ne kuljetetaan sähköntuotannossa voimalaan ja polttoaineissa käyttöpisteelle (kuva 1). Uusiutuvan energian osalta ei aina edellisen kaltaista prosessia tarvita.

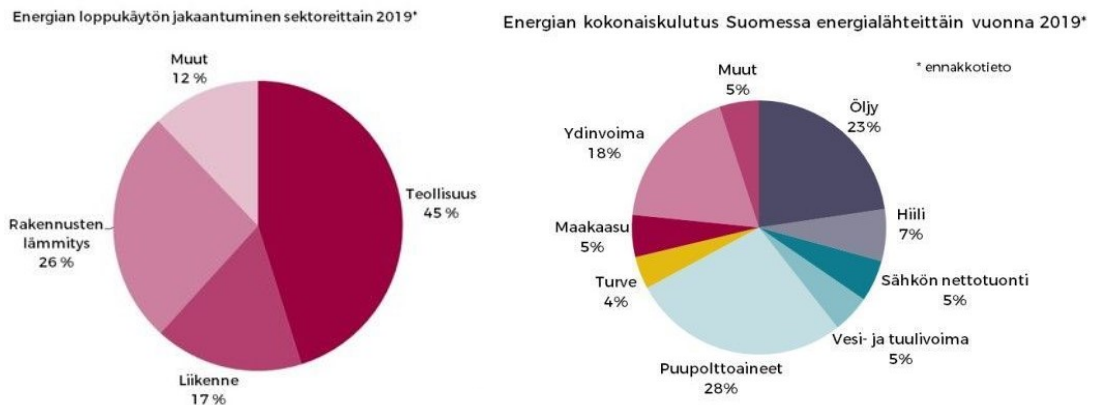


KUVA 1. Tyypillinen energialähteiden kiertokulku. Osa energialähteistä vaatii enemmän kaivuutyötä, pumppaamista, prosessointia ja kuljetusta kuin toiset.

Näitä asioita on tarkasteltu muun muassa seuraavilla termeillä: PEF (Primary energy fuction), WTT (well to tank) ja WTW (well to wheels). PEF:llä tarkoitetaan energiantuotantomenetelmään kuluvan energian ja siitä saatavan suhdetta, joka

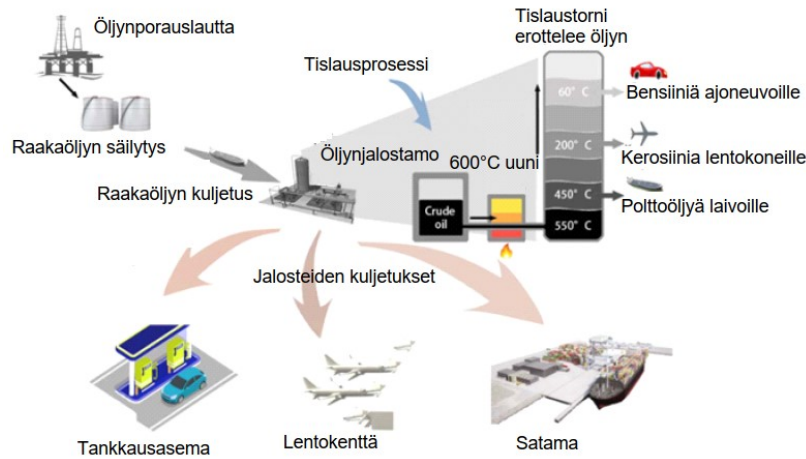
on kokonaishyötysuhteen käänteisluku. WTT ja WTW sanojenmukaisesti käsittelevät energiankulutusta raaka-aineesta tankkiin tai raaka-aineesta etenevään energiaan ajoneuvoissa, mutta yleisesti näitä tarkastellaan päästöjen osalta. Työssä tarkastellaan asiaa osittain kaikkien edellä mainittujen tarkastelunäkökulmien osalta, mutta työssä perehdytään myös siihen, mistä nämä erot johtuvat.

Työhön valitut raaka-aineet ovat tyypillisiä niin kuluttajien kuin teollisuudenkin käytössä. Seuraavat ympyrädiagrammit (kuva 2) kuvastavat hyvin, mihin energiaa tarvitaan ja mistä sitä saadaan. Oikeanpuolimmainen ympyrä kertoo primäärienergiamuotojen osuuden kokonaiskulutuksesta. Osa niistä on muunnettu lopulta sähköksi, lämmöksi tai käytetty liikenteeseen, jonka esimerkiksi öljy hyvin pitkälti kattaa.



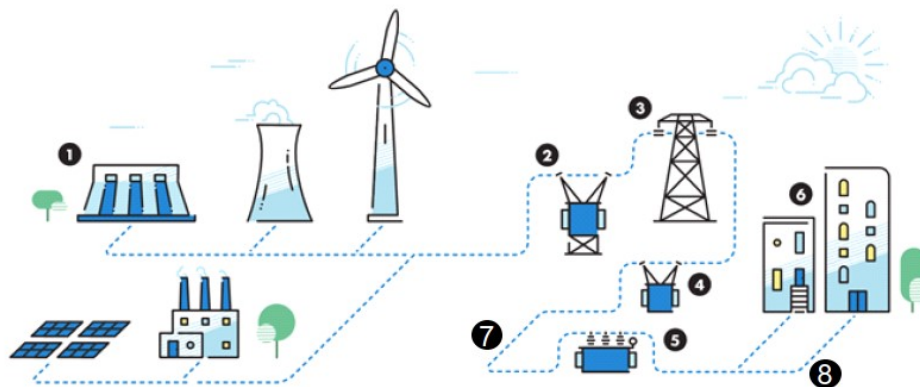
KUVA 2. Energian loppukäyttö Suomessa vuonna 2019 ja energialähteet, joilla kulutus on katettu samana vuonna. Kokonaiskäyttö on 298 TWh (54 MWh/asukas) ja kokonaiskulutus, joka sisältää polttoaineista vapautuvan energian on 378TWh (68 MWh/asukas). Sähköenergian tuotannon osuus oli 66 TWh ja sitä kulutettiin 86 TWh eli 20 TWh sähköenergiaa tuotiin ulkomailta. (Motiva)

Ensimmäistä kuvaa tukee kuva 3, jossa esiintyy raakaöljyn kiertokulku, joka on hyvin yleinen muissakin energialähteissä. Öljyntuotanto lähtee liikkeelle raakaöljyn pumppauksesta. Pumppausvaiheessa öljypumput pumppaavat maan alta öljyä, josta se siirretään öljyputkistoja pitkin öljysatamiin tai suoraan jalostamoihin. Jalostusvaiheessa raakaöljy käsitellään kemiallisesti, mistä saadaan useita eri lopputuotteita. Jalostuksen jälkeen tuotteet jälleen kuljetetaan kuorma-autoilla jakelupisteisiin.



KUVA 3. Sähkön ja raakaöljyn tuotanto- ja jakeluketju. (IELTS Tutors, muokattu)

Edeltävän kaltainen raakaöljyn kiertokulku tullaan myös tarvitsemaan useissa sähköntuotantomenetelmissä lukuun ottamatta muutamia uusiutuvia sähköntuotantomenetelmiä. Sähköntuotannossa tulee myös raaka-aineet kaivaa, kuljettaa ja jalostaa, kuten hiiltä tai ydinvoimaa käytettäessä. Biomassaa, kaasua tai puupolttoaineita käytettäessä vaaditaan myös valmisteluja, ennen kuin niistä voidaan tuottaa sähköä. Prosessin viimeinen vaihe on raaka-aineiden käyttäminen laitoksissa, joissa ne muunnetaan sähköksi. Tämän jälkeen sähkö muunnetaan korkeaan jännitteeseen siirtohäviöiden minimoimiseksi ja takaisin pienempään jänniteeseen ennen kuluttajia, jotta sähkön käyttö olisi turvallista (kuva 4).



- ① Sähköntuotanto
- ② Muuntaja: jännite suurjännitteeksi
- ③ Suurjänniteverkko
- ④ Muuntaja: suurjännite keskijännitteeksi
- ⑤ Muuntaja: keskijännite pienjännitteeksi
- ⑥ Käyttäjät: kotitaloudet, teollisuus, ajoneuvot...
- ⑦ Keskijänniteverkko
- ⑧ Pienjänniteverkko

KUVA 4. Sähkötuotannon jakeluketju. (Con Edison, muokattu)

Suomessa sähköverkosto koostuu suur-, keski- ja pienjänniteverkosta, joiden jännitealueet ovat samassa järjestyksessä 110–400, 1–36 ja 0–1 kV. Korkealla



jännitteellä pyritään pienentämään virtaa minimoiden siirtoverkon tehohäviöitä, mutta siitä huolimatta sähköverkon häviöt ovat Suomessa kahdesta kolmeen prosenttia virtalämpö- ja koronahäviöiden takia. Häviöt ovat erittäin matalalla tasolla verrattuna muihin maihin, joissa voi olla nykyäänkin yli 10 % sähköhäviöt. Ruotsi, Viro, Venäjä ja Norja ovat liitetty Suomen sähköverkkoon, jolloin energiaa voidaan siirtää molempiin suuntiin tuotannosta ja kulutuksesta riippuen. Yhteydet käyttävät suurjännitettä, joka on tasa- tai vaihtosähköä.

## 2 TYÖN KUVAUS JA MÄÄRITTELY

Työssä käsitellään energialähteiden hyötysuhdetta, joka tarkoittaa lähteeseen käytettyä energiamäärää ja siitä saatavan energiamäärän suhdetta. Koska kaikista eri vaiheista olevaa tarkkaa tietoa ei ole saatavilla, on työssä tarkoituksena hakea perustellut suuruusluokka-arviot energiamääristä. Energiankulutukset tullaan laskemaan polttoaineiden valmistukseen kuluva kokonaisenergiamäärästä, ei energian tarvevaateesta (esim. kineettisen energian fysiikan laskut). Muun muassa polttoaineet eivät muunnu täysin liike-energiaksi raaka-aineiden siirrossa.

Eri energialähteisiin vaaditaan erilaiset prosessit, mutta lopulta kaikissa esiintyy hyvinkin sama kaava lukuun ottamatta muutamia poikkeuksia. Yleisesti prosessi etenee seuraavalla tavalla: raaka-aineen kaivuu, raaka-aineen kuljetus, raaka-aineen jalostus, jalostetun aineen kuljetus ja sen käyttö. Viimeinen vaihe eli käyttö tarkoittaa sitä, kun aineen energia on käsissämme valmiiksi käytettävissä, esimerkiksi sähkö pistorasian päässä tai polttoaine tankkausasemalla. Sähkön käytön osalta tämä tarkoittaa sitä, että voimalaitoksen hyötysuhde tulee vielä edellä mainitun prosessikaavan lisäksi sähkönsiirtohäviöineen.

Työstä jätetään tietoisesti pois kaivuu- ja jalostuspaikkojen rakentamiset, niihin liittyvät työmatkat ja muut laskuja monimutkaistavat asiat. Ne oletetaan enemmän tai vähemmän tasavertaisiksi. Työssä tarkastellaan eri energiantuotantotapojen käyttötilannetta kuvastaen niiden jokapäiväistä rutiinia.

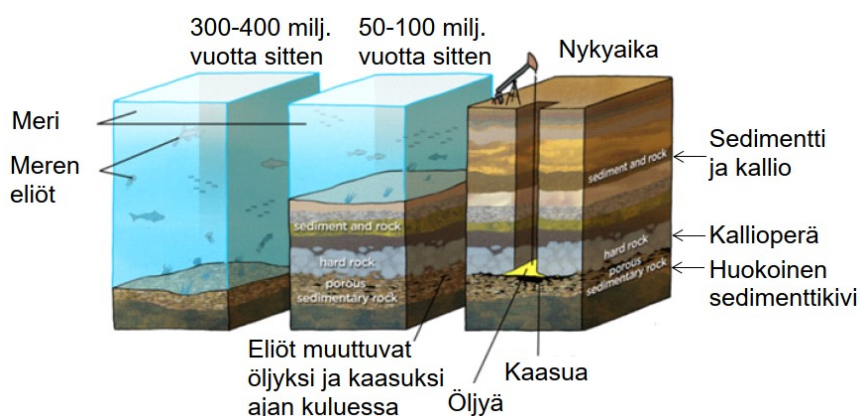
Kuljetushäviöt sovelletaan ajoneuvojen energiasaavuuteen Suomessa eli kuinka pitkälle polttoaineita tai sähköä tulee viedä keskimääräisesti. Myöhemmin tullaan soveltamaan myös saatuja lukuarvoja ajoneuvojen hyötysuhteisiin, mikä tulee havainnollistamaan, kuinka paljon tai vähän energiaraaka-aineiden energiasisällöstä lopulta liikuttaa ajoneuvoja. Lisäksi ajoneuvon ja energiantuotannon päästötarkastelua tullaan tarkastelemaan kuljettua matkaa kohti käyttäen apuna ajoneuvon energiantarvetta laskuissa.

### 3 POLTTOAINEET

Seuraavissa luvuissa esitetään energialähteiden teoriaa ja mistä niitä saadaan. Lisäksi avataan niiden prosessia lyhyesti, niin kuljetuksissa kuin jalostusvaiheissa.

#### 3.1 Diesel ja bensiini

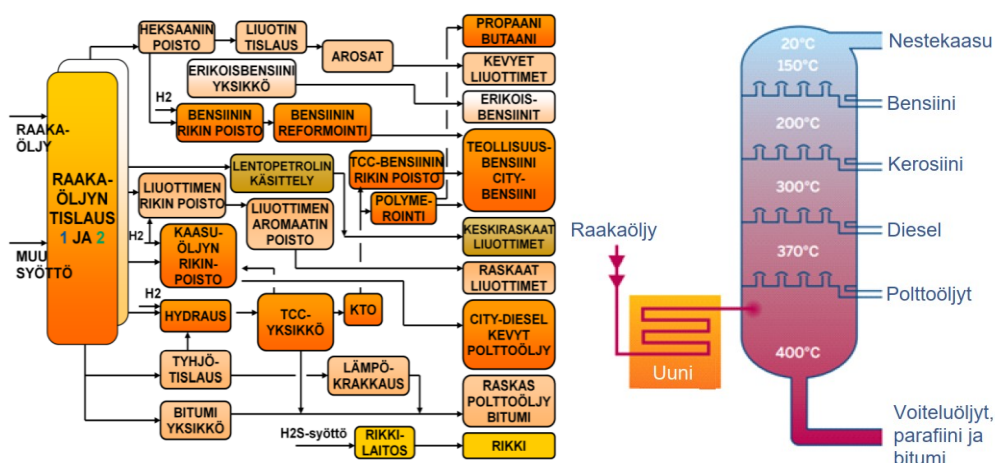
Lähes kaikki liikenteen vaatima energia katetaan öljytuotteilla, mutta kaikkiaan maailman energiatarpeesta 40 % tulee öljystä. Raakaöljy on syntynyt kemiallisista ja fysikaalisista prosesseista, jotka ovat muuttaneet kasvien ja eläinten jäänteet raakaöljyksi miljoonia vuosia sitten (kuva 5). Öljy sisältää hiiltä, vetyä, happea, rikkiä, typpeä, metalleja ja suolaa, joiden takia sitä pitää käsitellä, ennen kuin se on valmiina käyttöön. Siitä saadaan jalostettua useita tuotteita dieselin ja bensiinin lisäksi, joita ovat muun muassa lentopetroli, bitumi, rikki ja raskas polttoöljy. Suomessa jalostuspaikkoja ovat olleet Porvoo ja Naantali, joista jälkimmäinen on poistettu käytöstä huonontuneen kysynnän takia. (Suominen 2011)



KUVA 5. Raakaöljyn ja maakaasun syntyprosessi. (Toppr, muokattu)

Historiansa takia raakaöljy sijaitsee syvällä maaperässä, minkä takia se vaatii pumppausta. Pumpuilta matka vie öljynsiirtopumppausasemien ja siirtoputkistojen kautta suoraan jalostamoille tai raakaöljysatamiin. Siirtoputkistot voivat olla satoja kilometrejä pitkiä riippuen öljyenttien sijainneista. Mikäli putket eivät vie

suoraan jalostamoille, tulee raakaöljy kuljettaa raakaöljytankkereiden avulla jalostamoihin, joissa öljy prosessoidaan kuvan 6 mukaisella tavalla. Raakaöljystä poistetaan ensin suola korkean sähkökentän avulla, jonka jälkeen öljy tislataan oikeanpuoleisen kuvan tapaan. Tämän jälkeen öljystä poistetaan rikki vedyn avulla. Rikinpoiston jälkeen tuotteesta riippuen joko krakataan, alkyloidaan tai reformoidaan jalostetumpia tuotteita.



KUVA 6. Kooste öljynjalostusprosessista, joka on monivaiheinen. (Suominen 2011, CME group, muokattu)

Jalostuksen jälkeen yleensä matkat taittavat pienemmillä jalostetankkereilla kaupunkien öljysatamien säiliöihin, joista jakelu tapahtuu säiliöautoilla. Vaihtoehtoisesti jalostamokaupungeissa jalostamolta tankataan suoraan säiliöautoihin, mikä on harvinaisempaa jalostamopaikkojen vähäisyyden takia (kuva 3).

### 3.2 Maakaasu

Maakaasu on merkittävä energianlähde, mitä voidaan käyttää muun muassa ajoneuvoissa, kaukolämmössä tai sähköntuotannossa. Sitä esiintyy öljylähteiden tavoin kaasulähteissä maan alla, jonne maakaasu on muodostunut aikoinaan biomassan hajotessa anaerobisissa tiloissa (kuva 5). Jotta maakaasusta saadaan metaania, tulee sitä jalostaa epäpuhtauksista kuten öljystä, lauhdesta, vedestä, rikistä ja hiilidioksidista. Jalostaminen on yksinkertaisempaa kuin esimerkiksi öljynjalostus ja siitä saatava metaani on puhtaimmin palava fossiilinen polttoaine.

Suomessa kaasunjalostusta ei harjoiteta, vaan se tulee metaanina Suomeen Venäjältä siirtoputkistoja pitkin. (Alakangas 2016)

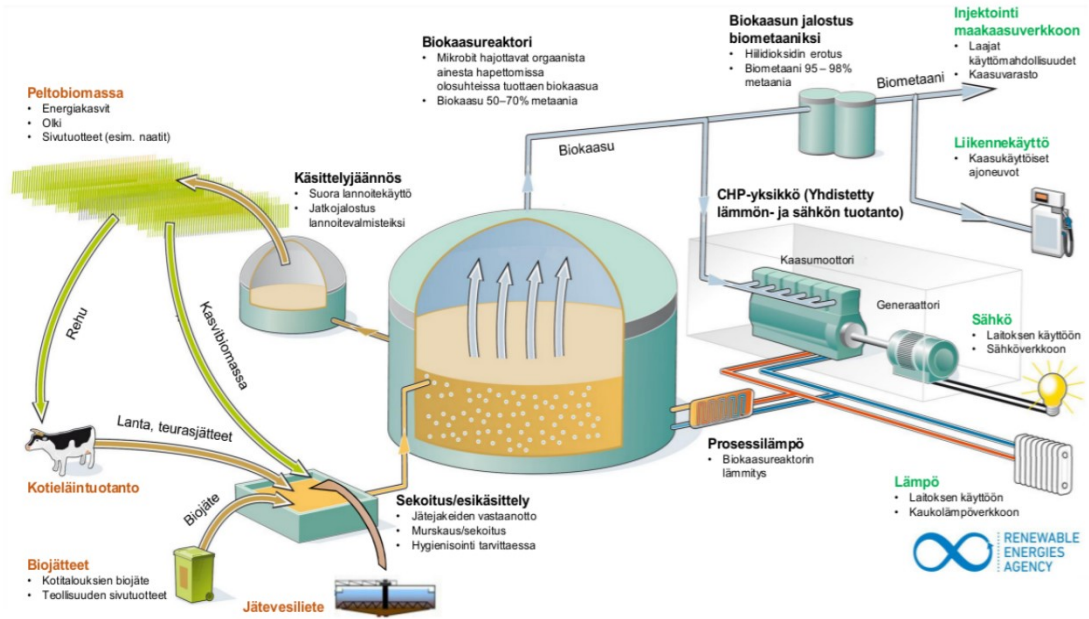
Maakaasun kiertokulku lähtee sen pumppaamisesta maan alta, mikä useimmiten tapahtuu maakaasun omalla paineella. Siitä kaasu kulkee yleensä putkistoja pitkin suoraan jalostukseen. Jalostuksessa poistetaan maakaasun epäpuhtaudet, mistä syntyy butaania, etaania ja propaania sivutuotteena, jotka tukevat kaasutuotannon kannattavuutta. Metaanin siirto tapahtuu jalostuksen jälkeen siirtoputkistoissa tai sitten se kuljetetaan laivoilla joko kaasuna CNG (compressed natural gas) tai nestemäisenä LNG (liquid natural gas). Maakaasu saadaan nestemäiseksi  $-160\text{ °C}$ :ssa, jolloin se pakkautuu 600 kertaa tiheämpään tilaan. (Lehtinen 2016)

### 3.3 Biokaasu

Toisin kuin maakaasu, biokaasu on uusiutuvaa energiaa, mitä syntyy esimerkiksi jätteitä mädättämällä. Mädätysprosessissa eloperäisiä aineita hajotetaan anaerobisissa eli hapettomissa olosuhteissa, josta syntyy metaania metaanibakteerien hajotustoiminnasta. Prosessista syntyy sivutuotteena myös vettä, typpeä, happea, vetyä ja ammoniakkia. Metaanista (50–70 %) ja hiilidioksidista (30–50 %) koostuvan biokaasun tärkein komponentti on maakaasun tavoin metaani. (Motiva 2020)

Metaani on voimakas kasvihuonekaasu, jolloin sen suoraan ilmaan päästämistä on syytä vähentää huomattavasti. Esimerkiksi Suomessa, keskikokoisella kaatopaikalla syntyy 200–400 m<sup>3</sup>/h metaanikaasua. Sitä suuremmalla syyllä biojätettä tulisi lajitella biojätteisiin, jotta kaatopaikoilta ei vapautuisi metaania ilmaan.

Biojätteiden mädätysprosessi on esitetty kuvassa 7. Erilaiset eloperäiset jätteet murskataan ja sekoitetaan lietteeksi, jonka jälkeen mädätysprosessi alkaa käydä. Siitä syntyy metaanista ja hiilidioksidista koostuvaa biokaasua, josta jälkimmäinen poistetaan. Prosessista syntyy lisäksi lämpöä, jota voidaan ottaa talteen. (Alakangas 2016)

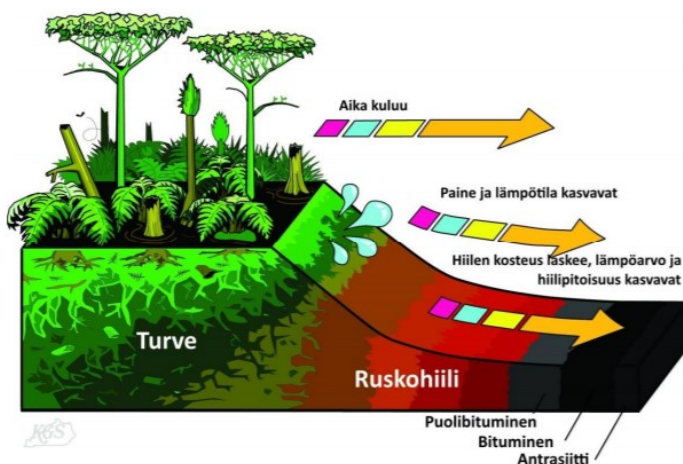


KUVA 7. Biokaasun prosessointi. (Kymäläinen & Pakarinen 2015)

## 4 SÄHKÖNTUOTANTO

### 4.1 Hiilivoima

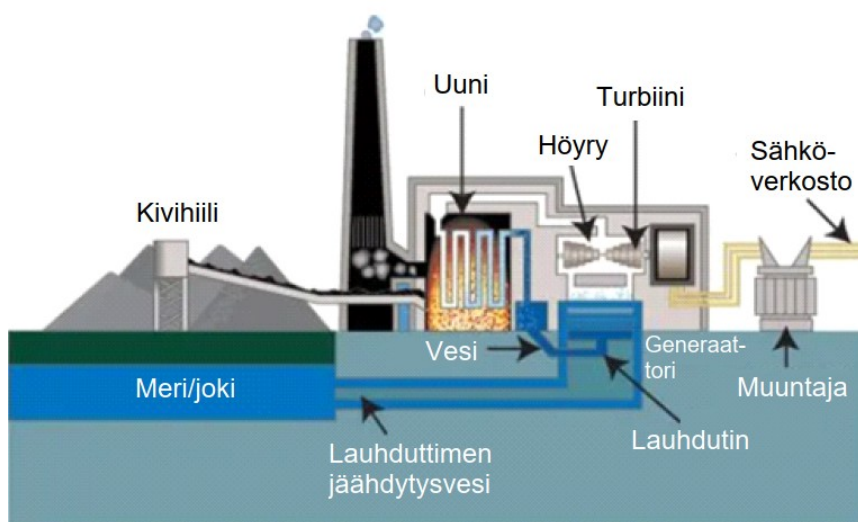
Hiilivoima tarkoittaa kivi- tai ruskohiilen käyttöä energianlähteenä sähköntuotannossa ja on maailman toiseksi käytetyin energialähde öljyn jälkeen. Kivi- ja ruskohiili kattaa vielä kolmasosan sähköntuotannosta maailmalla. Nämä hiilet ovat syntyneet aikoinaan kovassa paineessa hapettomissa olosuhteissa veden ja kaasujen poistuessa turpeesta, jolloin hiilet ovat jääneet maakerrosten väliin puristuksiin (kuva 8). (Alakangas 2020)



KUVA 8. Hiilen syntyprosessi. (Alakangas 2020)

Kivihiilen prosessi lähtee kaivoksilta, joissa kivihiiltä kaivetaan. Tämän jälkeen tulee kivihiilestä poistaa muun muassa tuhkaa, rikkiä, vettä ja likaa. Seuraavaksi kivihiili murskataan pienemmäksi. Käsittelyn jälkeen hiiltä kuljetetaan junilla, laivoilla tai kuorma-autoilla voimalaitoksille.

Voimalaitoksissa voidaan hiilellä tuottaa sähköä, lämpöä tai molempia yhtä aikaa. Molempia yhtä aikaa tuottaessa prosessi hyödyntää paremmin hiilestä saatavan lämpöenergian. Itse prosessissa hiili poltetaan uunissa, joka kiehuuttaa vettä ja siitä muodostuva vesihöyry pyörittää turbiinia (kuva 9). Kombivoimaloissa (CHP) otetaan lauhdeveden lämpö talteen, jota voidaan käyttää esimerkiksi kaukolämmössä.

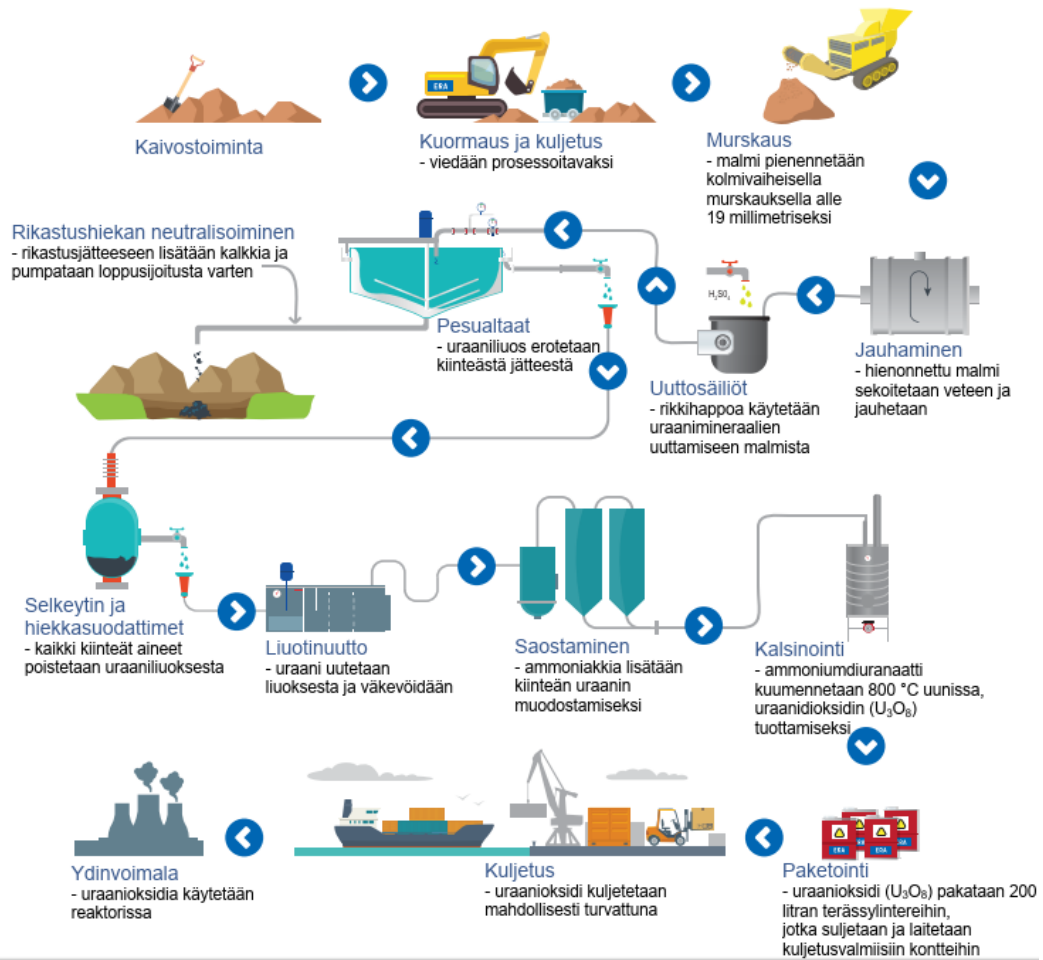


KUVA 9. Tyypillinen hiilivoimala, jossa tuotetaan sähköä ilma lämmöntalteenottoa. (Bright hub engineering, muokattu)

## 4.2 Ydinvoima

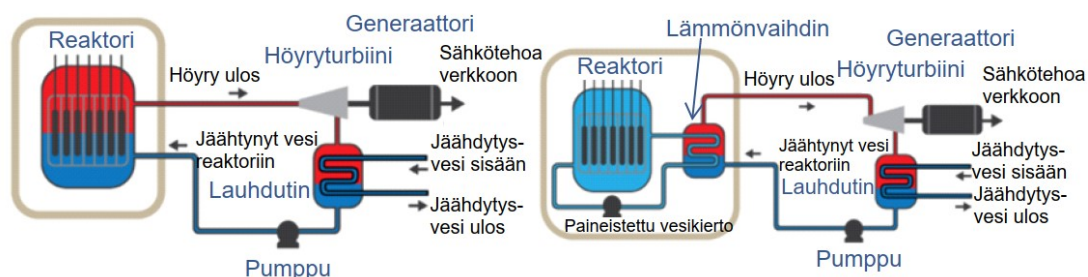
Ydinvoima perustuu alkuaine uraaniin, jota esiintyy hyvin pienissä määrin kerralla, sillä se on jakautunut maahan melko tasaisesti. Kun uraanipitoisuus on malmis vähintään gramma per malmikilo, voidaan sitä kutsua uraanimalmiksi. Uraania syntyy useasti muiden raaka-aineiden kaivuusta sivutuotteena, mutta se ei ydinvoimatuotantoon kelpaa sellaisenaan, vaan sitä tulee jalostaa epäpuhtauksista (kuva 10). Uraanimalmi käy ensin konversiolaitoksella (muutetaan uraaniheksafluoridiksi), jonka jälkeen se menee isotooppiirikastukseen. Isotooppiipitoisuus (U-235) kasvatetaan rikastamalla 0,7 %:sta 3–4 %:iin, mikä tarkoittaa noin kuudesta seitsemään tonnia luonnon uraania väkevöityyn tonniin. (Terrafame)





KUVA 10. Uraanin kiertokulku. (Energy resources of Australia, muokattu)

Uraanin valmistelun jälkeen se on kelpoista ydinvoimalaitokselle, jossa vesi kiehutetaan höyryksi joko kiehutus- tai painevesikattilassa fissioreaktiolla. Näin paineistettu vesihöyry pyörittää turbiinia, jossa samassa akselissa sijaitsee sähkögeneraattori (kuva 11). Höyrystynyt vesi jäähdytetään lämmönvaihtimella meriveden avulla, jolloin lämmintä jäähdytysvettä päätyy mereen. Painevesikattilassa on kaksi lämmönvaihdinta, jolloin toisiopiirin höyry kulkee turbiiniin. Kolmannella piirillä painevesikattilassa tapahtuu toisiopiirin jäähdytys. Kiehutusvesikattilassa on yksi piiri vähemmän eli toisiopiirillä jäähdytetään.

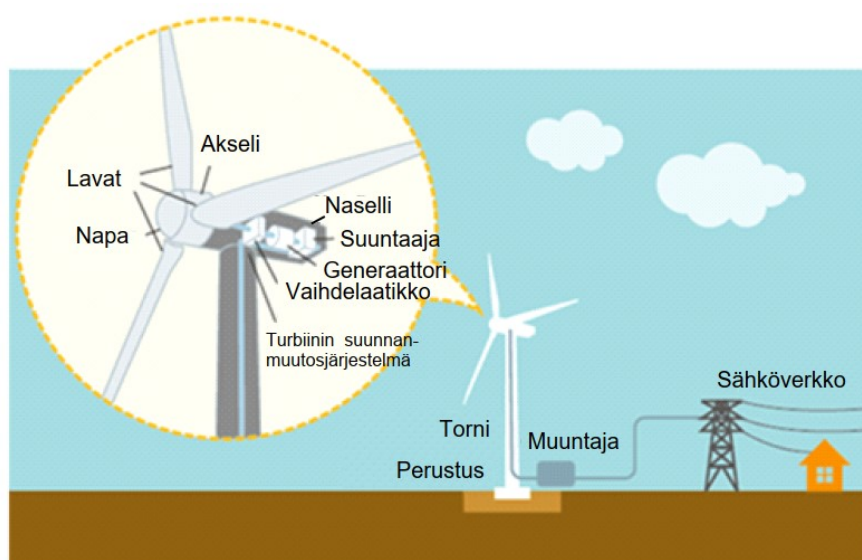


KUVA 11. Kaksi ydinreaktorityyppiä. Kiehumusvesi- ja painevesikattila. (Kaksijakoinen atomiydin, muokattu)

Reaktorikäytön jälkeen uraani on vielä säteilevää, mitä pitää turvallisesti säilöä, jotta haittaa ympäristöön ei koidu. Olkiluodon alueella käytetty uraani pakataan absorboivien kuparikapseleiden sisään, jotka kuljetetaan syvälle maan alle pitkäaikaiseen säilytykseen.

### 4.3 Tuuli- ja vesivoima

Tuuli- ja vesivoima perustuvat luonnonvaraisiin ilmiöihin, joissa muodostuu paljon energiaa. Tuulivoimassa (kuva 12) energia syntyy, kun ilma kulkee korkeapaineesta matalapaineeseen ilmassojen lämpötila- ja paine-erojen takia. Tuulesta saadaan tuulivoimaloiden lapojen muotoilujen avulla pyörivää liikettä, joka muunnetaan sähköenergiaksi generaattorilla.



KUVA 12. Tuulivoimala. (Toshiba, muokattu)

Vesivoimalassa (kuva 13) vesi virtaa padon yläpuolelta alas. Vesi yleensä padoon virtaavaan jokeen, johon muodostuu vesiallas. Vesimäärät altaissa riippuvat vesisateiden ja sulavien lumien määrästä, mutta veden virtausmäärää padon läpi voidaan säännöstellä sähkön tarpeen mukaan. Painovoimalla putoava vesi aiheuttaa pyörimisliikkeen turbiiniin. Vesivoima on tärkeä osa säätövoimaa, jota sähköverkossa tarvitaan, sillä useimmat sähköntuotantotavat ovat vakioitehoisia tai niitä ei pystytä hyvin säätämään.



KUVA 13. Vesivoimala. (Vattenfall, muokattu)

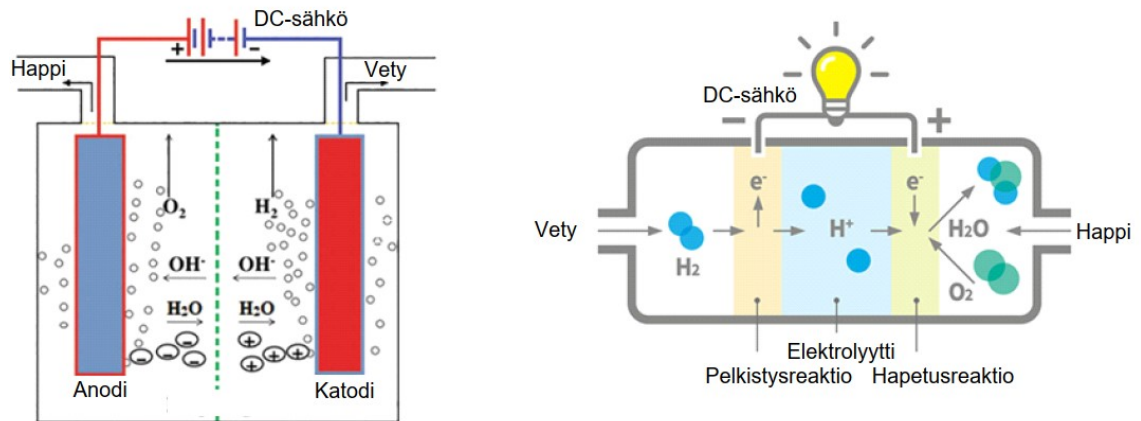
Tuuli- ja vesivoima eroavat työn muista energianlähteistä ja tuotantotavoista siten, että syöttöenergiaan ei kulu rahaa eikä valmistelu- tai prosessienergiaa. Toisaalta tuotantomenetelmien heikkous on niiden saatavuus, joka ei aina kohtaa kulutuksen kanssa. Tuulivoimaloiden hyötysuhteet ovat 30–40 % paikkeilla, mikä tarkoittaa tuulivoimalan läpi tuulevan energian olevan noin 2,5–3,3 kertaa suurempi kuin tuotetun energian. Vesivoimalan hyötysuhde on todella hyvä, sillä se ylittää 90 % hyötysuhteen, joka on lähellä ohi kulkevan veden liike-energian määrää.

#### 4.4 Vety

Vety on maailman yleisin kaasu, mutta sitä ei maapallolla juurikaan tavata muissa kuin yhdisteissä. Se on erittäin kevyt kaasu, mikä tekee sen varastoinnista haastavaa. Vety esiintyy nestemäisessä muodossa sen ollessa  $-253\text{ °C}$ :ssa. Sitä on enemmän yhdisteissä, kuten vedessä ja maakaasussa, josta se on irrotettavissa

esimerkiksi höyryreformoimalla tai elektrolyysillä. Höyryreformointia käytetään enimmäkseen öljynjalostamoilla, jossa vetyä tarvitaan hiilivetyjen katkomiseen. (Motiva 2020)

Höyryreformoinnissa aiheutuu päästöjä, jolloin se ei ole kestävä tapa valmistaa vetyä. Tällöin vaihtoehtoinen tapa valmistaa sitä on elektrolyysi (kuva 14), jossa vetyä erotetaan vedestä sähkön avulla. Vetyä on yleensä tarkoitus tehdä energiavarastoksi, jota voidaan tarvittaessa muuntaa sähköksi polttokennomenetelmällä (kuva 14). Vetyä on ominaisuuksiensa puolesta hankalaa varastoida, koska se vaatii ison paineen tai matalan lämpötilan, jotta sitä saataisiin varastoitua järkevä määrä suhteessa tilavuuteen. Tämän lisäksi vetyä haihtuu varastoinnista noin neljäsosa kuukaudessa. (Tilanterä 2016)

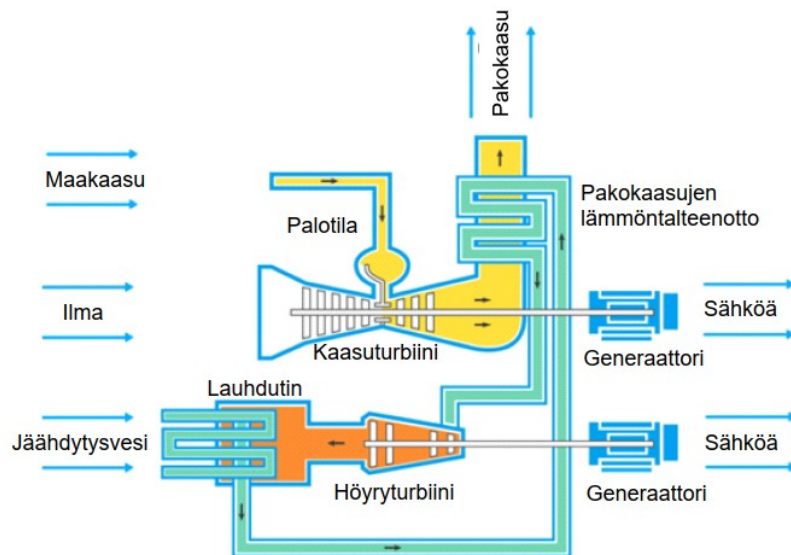


Kuva 14. Elektrolyysin ja polttokennon periaate. (Yossef & Amal 2017, muokattu; Doosan, muokattu)

Vasemmassa kuvassa on esitetty elektrolyysin toimintaperiaate. Siinä elektrolyytinä toimivasta vedestä pelkistetään vety pois. Katodissa tapahtuu pelkistysreaktio ja anodissa tapahtuu hapettumisreaktio. Oikeanpuoleinen kuva esittää vedyn polttokennoreaktiota, joka on ikään kuin päinvastainen kuin elektrolyysi. Siinä vety syötetään kennon anodille, jossa se ionisoituu elektroneiksi ja protoneiksi. (Heikkilä 2013)

## 4.5 Maa- ja biokaasu

Suoran polttomoottorikäytön lisäksi maa- ja biokaasua käytetään energiantuotannossa. Energiaa saadaan kaasusta samalla tavalla, kuin hiilivoimaluvussa on kerrottu eli höyry- tai kaasuturbiinitekniikalla (kuva 9). Yleistymässä on kuitenkin CCPP-voimala (combined cycle power plant), jossa ensiöpuoli on hyvin samankaltainen kuin vanhemmissakin kaasuturbiinivoimaloissa. Tässä mallissa hyödynnetään lisäksi palokaasujen lämpöenergia lämmönvaihtimen avulla, jolla saadaan höyrykierto toisiossa olevalle höyryturbiinille (kuva 15). Tällaista voimalatyyppiä voidaan ottaa käyttöön myös öljynpoltossa. CCPP-voimalatyyppi voi kasvattaa sähköntuottohyötysuhdetta yli 50 %:n. (Engie)

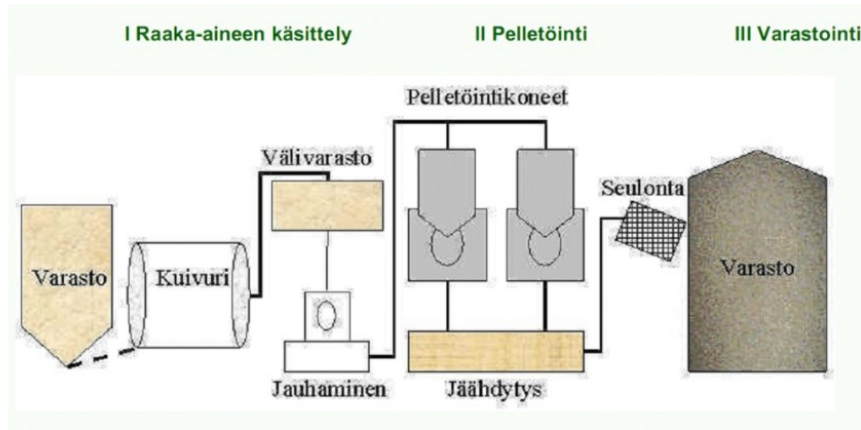


KUVA 15. CCPP-voimala. (Engie, muokattu)

## 4.6 Puu

Puupolttoaineet käsittävät Suomen energiantuotannosta lähes kolmasosan. Puupolttoaineet kuuluvat uusiutuviin energianlähteisiin, joihin kuuluvat myös biomassat, biokaasu ja -jätteet, joita saadaan paljon maataloudesta. Puupolttoaineet ovat uusiutuvaa energiaa, jotka ovat kasvuvaiheessa sitoneet saman verran energiaa kuin mitä niistä vapautuu käyttäessä. Puupolttoaineita saadaan esimerkiksi muusta puuta käsittelevästä teollisuudesta, joista tulee ylijäämänä puun kuorta, sahanpurua ja mustalipeää, jota syntyy sellutuotannosta. Mustalipeää voi käyttää sellaisenaan metsäteollisuuden energiakattiloissa, mutta puut, puun kuo-

ret ja sahan purut valmistetaan yleensä puupelleteiksi tai poltetaan suoraan metsähakkeena. Suomessa yli puolet käytetystä puusta päätyy energiaksi. Puutakin pitää käsitellä hieman ennen sen käyttöä, kuvassa 16 esimerkkinä puupellettien valmistus. (Maa ja metsätalousministeriö)



KUVA 16. Puupellettien valmistus. (Bioenergia)

Suomessa on noin 25 pelletintuotantolaitosta, joihin ylimääräiset puujakeet kuljetetaan rekoilla. Vaihtoehtoisesti pelletintuotanto voi olla puunjalostusteollisuuden yhteydessä, jolloin kuljetuksen hoitavat kuljettimet. Puuaineksesta tulee poistaa epäpuhtaudet, muun muassa kivet, metallit ja muovit. Puu sisältää myös paljon vettä, joten se tulee kuivata kuivurissa. Tämän jälkeen puu jauhetaan ja pelletöidään. Pellettejä voidaan käyttää kuluttajien kiinteistöjen lämmityksessä tai voimalatuotannossa. Pelletit ja biomassat voimalakäytössä poltetaan yleensä kivihiilen sekoituksena kivihiilivoimalaitoksessa. (Bioenergia)

Puupolttoaineiden hyötysuhdelaskentaa ei ole eritelty yksityiskohtaisten lähteiden puutteellisuuden takia. Puupolttoaineiden valmisteluihin kuluvasta kokonaisenergiasta on maininta lähteissä, joten niistä on laskettu keskiarvo, jota käytetään taulukoissa 3 ja 4 (Saprunov 2017; Pimentel 1980).

## 5 POLTTOAINEIDEN HYÖTYSUHDE

Tässä luvussa esitetään bensiinin ja dieselin laskelmat öljynjalostuksen kokonaishyötysuhteesta. Maa- ja biokaasun osalta tutkitaan aineistoista saatuja valmiita laskelmia. Alla olevassa taulukossa esitetään keskeiset tiedot tutkittavista polttoaineista, myös sähköntuotannon raaka-aineet ovat listattuna.

TAULUKKO 1. Polttoaineiden lämpöarvoja, tiheyksiä ja ominaispäästöjä. (Alakangas 2000; Motiva; The engineering toolbox)

Polttoaine	Lämpöarvo $w$ MJ/kg	Lämpöarvo $w$ kWh/kg	Tiheys $\rho$ kg/dm <sup>3</sup>	$q_{CO_2}$ gCO <sub>2</sub> /kWh
Bensiini	43	12,9	0,75	260
Diesel	41,5	12,7	0,85	250
Metaani	49,9	15,4	0,72	180
Vety	119	33	0,09	0
Kivihili	27,9	7	0,8	390
Uraani	86 400 000	24 000 000	19	0
Puu	16,2	4,5	0,5–0,8	410

### 5.1 Bensiini ja diesel

Bensiini ja diesel tehdään samasta raaka-aineesta, joten ne käsitellään samassa yhteydessä. Nämä tuotteet sisältävät lisäksi saman jakeluketjun. Tiedot saadaan Porvoon jalostamon ympäristöluvasta vuodelta 2006, jossa kerrotaan oleelliset tiedot.

Lasketaan ympäristölupapäätöksen tiedoilla vuoden 2007 arvioidut kulutus- ja tuotantomäärät, sillä niistä löytyy kattavimmin tietoa. Kuvassa 17 on esitetty edellä mainitut tiedot.

Tuote	2003 tonnia	2004 tonnia	Arvio 2007 tonnia
Kaasut	294 000	315 000	335 000
Bensiinit	3 706 000	3 814 000	4 200 00
Dieselöljy ja kevyt polttoöljy	5 658 000	5 222 000	6 100 000
Raskas polttoöljy	991 000	1 157 000	700 000
Bitumit	139 000	81 300	0
Rikki	48 000	62 000	128 000
Yhteensä	10 836 000	10 651 300	11 463 000

KUVA 17. Porvoon jalostamon tuotanto vuosina 2003 ja 2004, sekä arvio vuodelle 2007. (Ympäristölupapäätös 2006)

Laskujen ideana on suhteuttaa luvut kummankin polttoaineen energiankulutukseen. Esimerkiksi bensiini on hienojalosteisempaa kuin diesel, joten siihen oletettavasti kuluu hieman enemmän energiaa todellisuudessa. Toisaalta riittävän tarkkoihin tuloksiin päästään suhteuttamalla jalosteiden osuudet kokonaistuotannon energiankulutuksesta. Lasketaan bensiinin ja dieselin osuus kokonaistuotannosta kaavalla 1.

$$\begin{aligned} \text{Bensiinin osuus} &= \frac{\text{tuotanto vuodessa tuotteelle}}{\text{kokonaistuotanto}} = \frac{4\,200\,000\,t}{11\,463\,000\,t} \cdot 100\% \quad (1) \\ &= 36,6\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Dieselin osuus} &= \frac{\text{tuotanto vuodessa tuotteelle}}{\text{kokonaistuotanto}} = \frac{6\,100\,000\,t}{11\,463\,000\,t} \cdot 100\% \quad (1) \\ &= 53,2\% \end{aligned}$$

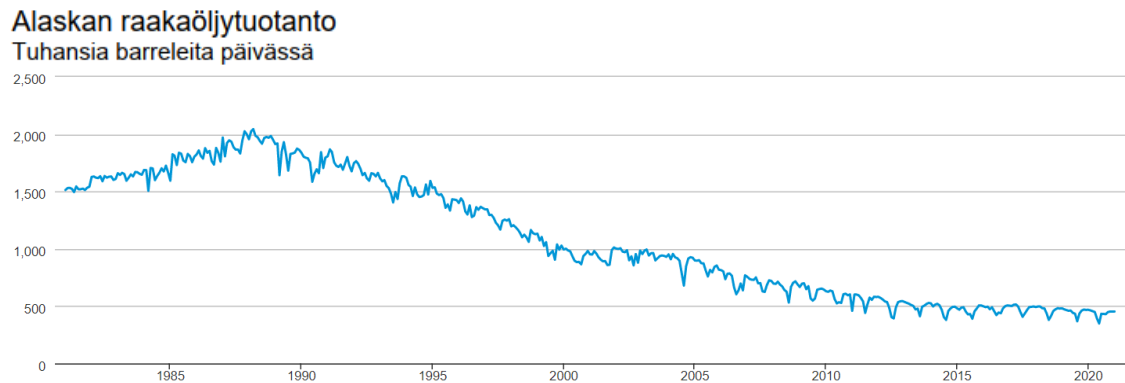
Prosenttiluvuilla tullaan seuraavien lukujen laskujen tulokset huomioimaan saaduilla osuuksilla. Luvut tulevat etenemään prosessijärjestyksessä.

### 5.1.1 Öljykenttä

Raakaöljy pumpataan maaperästä ja sitä siirretään öljykentiltä satamiin tai jalostamoihin putkistoissa, jotka voivat pitkiäkin rakennelmia. Tarkastellaan tässä yhteydessä noin 1000 km matkaa Alaskan öljykentiltä öljysatamaan, missä olosuhteet vastaavat Venäjän olosuhteita. Vuonna 1978 raakaöljyä kulki 1,6 miljoonaa



barrelia (159 l) päivässä Alaskan raakaöljysiirtoputkistoissa (kuva 18) ja raakaöljyputkistokokonaisuuden energian kokonaiskulutus oli samana vuonna 4690 terajoulea. (Hooker 1980. s.148)



KUVA 18. Alaskan raakaöljyn tuotanto vuosittain, mikä on ilmoitettu barreileina päivässä. (EIA, muokattu)

Lasketaan kaavalla 2 kulutettu energia öljylitraa kohden. Muunnetaan joulet kilowattitunneiksi, tuotantobarrelit litroiksi ja kerrotaan vuoden vuorokausien määrällä.

$$1 \text{ MJ} = 277 \text{ Wh}$$

$$\begin{aligned} \text{Kulutettu energia öljylitraa kohden} &= \frac{\text{energiankulutus vuodessa}}{\text{tuotantomäärä vuodessa}} & (2) \\ &= \frac{4690 \cdot 10^{12} \text{ J} \cdot 2,77 \cdot 10^{-4} \text{ Wh}}{365 \text{ d} \cdot 1,8 \cdot 10^6 \text{ b} \cdot 159 \text{ l/b}} = 12 \text{ Wh/l} \end{aligned}$$

Suhteutetaan saatu arvo jalosteisiin kaavalla 3.

$$E_{\text{benssiini}} = 0,366 \cdot 12 \text{ Wh} = 4,4 \text{ Wh/l} \quad (3)$$

$$E_{\text{diesel}} = 0,532 \cdot 12 \text{ Wh} = 6,4 \text{ Wh/l} \quad (3)$$

Öljyn pumppausta maan alta ei ole laskussa otettu huomioon, mutta sen oletetaan olevan häviävän pieni pumppausmatkojen ollessa murto-osan edellisen laskuun verrattuna. Laskusta huomataan kulutetun energian olevan vähäistä pumppausvolyymien ollessa todella suuria.

### 5.1.2 Raakaöljyn kuljetus

Tarkastellaan raakaöljyn kuljetukseen kuluva energiaa. Raakaöljy tuodaan Suomeen isoilla raakaöljytankkereilla, sillä öljynsiirtoputkistoa ei Suomen jalostamoihin tule perille saakka. Seuraavaksi tarvitaan tankkerin käyntimäärät vuodessa, polttoaineenkulutuksen tiedot sekä matkan pituus, jotta saadaan laskettua polttoainemäärät. Alla olevan kuvan avulla saadaan laskettua tankkerin käyntimäärät.

Syöttöaine	Määrä (t)	Rikkipitoisuus (% ka.)	Rikki (t)
<b>2003</b>			
Raakaöljy ja kondensaatit	9 691 000	0,65	63 300
Muu syöttö	1 013 000	0,62	6 200
<b>Yhteensä</b>	<b>10 704 000</b>	<b>0,65</b>	<b>69 500</b>
<b>2004</b>			
Raakaöljy ja kondensaatit	9 546 000	0,77	73 600
Muu syöttö	1 536 000	0,62	9 500
<b>Yhteensä</b>	<b>11 082 000</b>	<b>0,75</b>	<b>83 100</b>

Syöttöaineiden käyttö vuonna 2007 on arviolta 11,5 miljoonaa tonnia. Tuotantolinja 4:n käyttöönotto ei muuta jalostamon syöttökapasiteettia.

KUVA 19. Porvoon jalostamon syöttöaineiden käyttö vuosina 2003 ja 2004 sekä arvio vuodesta 2007. (Ympäristölupapäätös 2006)

Kuvan 19 mukaan Suomeen tuotiin vuonna 2007 arviolta 11,5 miljoonaa tonnia raakaöljyä. Todellisuudessa sama laiva ei öljyä hae, mutta käytetään esimerkkinä raakaöljytankkeria nimeltä Stena Arctica, johon mahtuu 117 000 tonnia öljyä. Tämä tarkoittaa noin 100 käyntiä vuodessa täydessä lastissa. Laiva kuluttaa täydessä lastissaan 15 solmun tuntinopeudessa 70 000 litraa dieseliä päivässä (Laivakuvat). Arvio laivan kulutuksesta tyhjänä on noin 20 000 litraa päivässä. Suomeen raakaöljy tuodaan Venäjän Koiviston raakaöljysatamasta, josta matkaa Porvoon jalostamoon on noin 200 km (Google maps). Tämä matka kuljetaan tyhjänä sekä täydessä lastissa.

Lasketaan raakaöljytankkerin dieselin kulutus. Muunnetaan solmunopeus kilometreiksi tunnissa (nopeus  $v$ ), jotta saadaan matkaan ( $s$ ) kuluva aika ( $t$ ).

$$1 \text{ mpk/h} = 1,85 \text{ km/h}$$

$$t = \frac{s}{v} = \frac{200 \text{ km}}{15 \text{ mpk/h} \cdot 1,852 \text{ km/h}} = 7,25 \text{ h} \quad (4)$$

Muunnetaan vuorokaudet tunneiksi, jolloin saadaan käsitys kulutuksesta pienemässä mittakaavassa.

$$\begin{aligned} \text{polttoainekulutukset tunnissa} &= \\ &= \frac{20\,000 \text{ l/d}}{24 \text{ h}} = 833 \text{ l/h}; \frac{70\,000 \text{ l/d}}{24 \text{ h}} = 2920 \text{ l/h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{polttoaineenkulutus matkoissa} &= \text{matkat tyhjänä} + \text{matkat täynnä} \\ &= 200 \text{ km} \cdot 7,25 \text{ h} \cdot 833 \text{ l/h} + 200 \text{ km} \cdot 7,25 \text{ h} \cdot 2920 \text{ l/h} \\ &= 5\,441\,850 \text{ l} \end{aligned} \quad (5)$$

Muunnetaan tulos energiaksi kaavalla 6 käyttäen apuna dieselin (öljytankkerin polttoaine) lämpöarvoa, joka on 10,8 kWh/l (taulukko 1). Muutetaan tulos sen jälkeen bensiinin ja dieselin osuudeksi kuljetuksesta kaavalla 3.

$$\begin{aligned} E &= \text{kokonaiskulutus} \cdot w_{\text{diesel}} \\ &= 5\,441\,850 \text{ l} \cdot 10,8 \text{ kWh/l} = 58\,771\,980 \text{ kWh} = 58,8 \text{ GWh} \end{aligned} \quad (6)$$

$$E_{\text{bensiiini}} = 0,366 \cdot 58,8 \text{ GWh} = 21,5 \text{ GWh} \quad (3)$$

$$E_{\text{diesel}} = 0,532 \cdot 58,8 \text{ GWh} = 31,3 \text{ GWh} \quad (3)$$

Tämän jälkeen muunnetaan suhteutettu energian kokonaiskulutus litraa bensiiniä kohti. Bensiini tiheys on 0,75 kg/l ja dieselin 0,85 kg/l (taulukko 1). Muunnetaan ensin tuotantoyksikkö tonni kuutioksi kaavalla 7.

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (7)$$

$$E_{\text{bensiiini}} = \frac{4\,200\,000 \text{ t}}{0,75 \text{ kg/l}} = 5\,600\,000 \text{ m}^3 \rightarrow \frac{21,5 \text{ GWh}}{5\,600\,000 \text{ m}^3} = 3,8 \text{ Wh/l} \quad (7)$$

$$E_{\text{diesel}} = \frac{6\,100\,000 \text{ t}}{0,85 \text{ kg/l}} = 7\,176\,000 \text{ m}^3 \rightarrow \frac{31,3 \text{ GWh}}{7\,176\,000 \text{ m}^3} = 4,4 \text{ Wh/l} \quad (7)$$

Tulokseksi saadaan 3,8–4,4 Wh kuljetusenergiaa raakaöljynkuljetuksessa litraa kohden.

### 5.1.3 Raakaöljyn jalostus

Lasketaan kuvan 20 mukaan Porvoon jalostamon kokonaisenergian kulutus vuonna 2007. Tähän kuuluvat höyryn, lämmön (arvio), sähkön, kaasun, öljyn ja kaasun energiasisällöt. Ympäristölupapäätöksen mukaan suurin osa tuotetusta energiasta menee öljynjalostamon käyttöön.

	2003 GWh/a	2004 GWh/a	Arvio 2007 GWh/a
Höyry	3 990	3 890	3 600
Sähkö	1 070	1 000	1 200
Lämpö	230	244	

Polttoaine	Lämpöarvo (GJ/t)	Jalostamo (t/a)	Jalostamo <sup>1)</sup> (TJ/a)	Voimalaitos (t/a)	Voimalaitos <sup>2)</sup> (TJ/a)	Yhteensä (TJ/a)
Jalostamo-/polttokaasu	49,0	400 000	19 600	4 000	200	19 800
Polttoöljy (POK)	42,2			500	20	20
Maakaasu (1 000 m <sup>3</sup> )	36,0 <sup>3)</sup>	205 000 <sup>3)</sup>	7 400	235 000 <sup>3)</sup>	8 500	15 900
Pyrolyysiöljy	40,5			17 000	700	700
Raskas öljy	40,5			107 000	4 300	4 300
FCC-koksi	32,8	105 000	3 400			3 400
<b>Yhteensä</b>			<b>30 400</b>		<b>13 700</b>	<b>44 100</b>

KUVA 20. A: Porvoon jalostamon höyryn-, sähkön- ja lämmöntuotanto vuosina 2003, 2004 ja arvio vuodelle 2007. B: Arvio polttoaineiden käytöstä Porvoon jalostamolla vuonna 2007. (Ympäristölupapäätös 2006)

Kuvan perusteella lasketaan käytetyt energiamäärät yhteen.

#### *Kokonaiskulutus*

$$= 3600 \text{ GWh} + 1200 \text{ GWh} + 250 \text{ GWh} + 44,1 \cdot 10^9 \text{ MJ} \cdot 277 \text{ W} \cdot 10^{-9} \text{ GWh} = 17266 \text{ GWh} = 17,27 \text{ TWh}$$

Suhteellisesti bensiiniin ja dieseliin jalostusvaiheessa kulutettu energia saadaan laskettua kaavan 3 mukaisesti.

$$E_{\text{bensiini}} = 0,366 \cdot 17,27 \text{ TWh} = 6,23 \text{ TWh} \quad (3)$$

$$E_{\text{diesel}} = 0,532 \cdot 17,27 \text{ TWh} = 9,19 \text{ TWh} \quad (3)$$

Muunnetaan kulutus litraa kohden kaavan 7 avulla.

$$E_{\text{bensiini}} = \frac{4\,200\,000 \text{ t}}{0,75 \text{ kg/l}} = 5\,600\,000 \text{ m}^3 \rightarrow \frac{6,23 \text{ TWh}}{5\,600\,000 \text{ m}^3} = 1,11 \text{ kWh/l} \quad (7)$$

$$E_{diesel} = \frac{6\,100\,000\text{ t}}{0,85\text{ kg/l}} = 7\,625\,000\text{ m}^3 \rightarrow \frac{9,19\text{ TWh}}{7\,176\,000\text{ m}^3} = 1,205\text{ kWh/l} \quad (7)$$

Tulokset kertovat jalostusvaiheen energiankulutuksen tuotettua litraa kohti.

#### 5.1.4 Bensiinin ja dieselin kuljetus

Tarkastellaan seuraavaksi valmiin tuotteen kuljetusta. Pidemmät öljytuotekuljetukset suoritetaan laivoilla öljysatamiin. Raakaöljytankkerilaskusta saadun tuloksen mukaan siihen voidaan arvioida kuluvan pienemmän kuljetusmäärän ja pidemmän matkan takia hieman enemmän, noin 30 Wh valmista tuotelittraa kohti.

Öljysatamien säiliöistä jakelu tapahtuu säiliöautoilla. Arvioidaan keskimääräiseksi säiliöauton kuljetusmatkaksi Suomessa 200 km:ä, sillä rannikolla sijaitsee öljytuotesatamia useita. Raskas säiliöauto (20,8m<sup>3</sup>) kuluttaa tyhjänä noin 12 litraa 100 kilometriä kohden ja täynnä 41 l (kuljetusala). Lasketaan säiliöauton dieselin kulutus, kun matkat ajetaan sekä tyhjässä että täydessä lastissa. Muunnetaan sen jälkeen tulos muotoon energiaa per litra tuotetta.

$$\text{Dieselin määrä} = 2 (200\text{ km}) \cdot 12\text{ l}/100\text{ km} + 2\text{ km} \cdot 41\text{ l}/100\text{ km} = 106\text{ l} \quad (5)$$

$$\text{Energiamäärä kuljetuksessa} = 106\text{ l} \cdot 10,8\text{ kWh} = 1144,8\text{ kWh}$$

$$\text{Energiamäärä litraa kohden bensiiniä} = \frac{1144,8\text{ kWh}}{20\,800\text{ l}} = 55\text{ Wh/l}$$

$$\text{Kuljetukset yhteensä} = (30 + 55)\text{ Wh/l} = 85\text{ Wh/l}$$

Tulokset pätevät myös dieselin kuljetukseen, joka on oletettavasti hyvin pitkälti samaa suuruusluokkaa kuin bensiininkin kuljetus.

#### 5.1.5 Hyötysuhteet

Huomataan, että jalostusvaihe on energiaa kuluttavin, kun taas kuljetuksissa päästään melko vähällä. Tulokset saadaan laskettua, kun tiedetään aineista saatava ja niihin kulutettu energia yhteensä. Hyötysuhteet saadaan laskettua, kun

bensiinin ja dieselin ominaisenergioista (taulukko 1) vähennetään kulutettu energia, mikä jaetaan taas aineen ominaisenergialla (kaava 8).

$$E_{benssiini}/l = 4,4Wh + 3,8 Wh + 1112,5 Wh + 85 Wh = 1206 Wh/l$$

$$\eta_{valm.} = \frac{\text{aineen lämpöarvo} - \text{aineeseen kulutettu energia}}{\text{aineen lämpöarvo}} \quad (8)$$

$$\eta_{valm.benssiini} = \frac{9700 Wh - 1206 Wh}{9700 Wh} \cdot 100 \% = 88 \% \quad (8)$$

$$E_{diesel}/l = 6,4Wh + 4,4 Wh + 1205 Wh + 85 Wh = 1303 Wh$$

$$\eta_{valm.diesel} = \frac{10800 Wh - 1303 Wh}{10800 Wh} \cdot 100 \% = 88 \% \quad (8)$$

Molemmat polttoaineet ovat valmisteluhyötysuhteeltaan samaa suuruusluokkaa.

## 5.2 Maa- ja biokaasu

Maakaasukenttäpaikan mukaan maakaasun prosessin eri vaiheiden energiankulutukset eroavat toisistaan melko paljon. Maakaasun prosessointi ei kuluta paljoa energiaa, mutta kaasun pumppaus toimii heikolla hyötysuhteella kuvan 21 mukaan. Pumppausvaiheen heikon hyötysuhteen selittää todennäköisesti maakaasun vuotoherkkyys siirtoputkistoissa ja säilytyksessä. Alla olevissa kuvissa on valmiiksi laskettu eri prosessivaiheiden hyötysuhteet, joista saadaan valmisteluhyötysuhteet 83,7 % kaasulle ja 61 % nestemäiselle kaasulle. (Pimentel 1980)

### Maakaasu merialueella

	Energia	
	%	10 <sup>9</sup> Btu/ 10 <sup>12</sup> Btu
Uuttaminen	NA	NA
Pumppaus	89.2	0
Prosessointi	96.6	0
Jakelu	97.1	0
Yhteensä	83.7	
Hyötysuhde	83.7%	

### Alaskan maakaasu Alaskan putkistojen ja LNG- takkerin kautta

	%	10 <sup>9</sup> Btu/10 <sup>12</sup> Btu
Uuttaminen	NA	NA
Pumppaus	89.2	0
Prosessointi	96.6	0
Siirtäminen	97.1	0
LNG nesteyttäminen	83.0	0
LNG tankkeri	96.4	24.3
LNG varastointi	100.0	2.81
LNG höyrystäminen	98.0	.71
Jakelu	97.1	0
Yhteensä	63.7	27.82
Hyötysuhde	61.0%	

KUVA 21. Maakaasun eri prosessivaiheiden hyötysuhteita. (Pimentel 1980, muokattu)

Kuvien taulukoiden mukaan Alaskan maakaasuprosessista tulee hyötysuhteeltaan heikompi, kuin merellä sijaitsevasta maakaasun tuotannosta. Lisäenergiankulutus koostuu maakaasun jäähdyttämisestä nestemäiseen muotoon. Toisaalta maakaasun ollessa nestemäisessä muodossa tulisi kuljetuksessa ja jakelussa tulla parempia hyötysuhteita kuin kaasumaisen, sillä maakaasu menee 600-keraisesti energiatiheämmäksi nestemäisenä. Kuvassa 22 on 28 vuotta tuoreempaa tietoa, mutta tulos on sama 0,5 prosenttiyksikön tarkkuudella offshore-tuotannon kanssa.

Energianlähde	Hyötysuhteet vaiheittain			Lopullinen hyötysuhde	
	Uuttaminen	Prosessointi	Kuljetus	Voimala	
Uusiutuvat energianlähteet	100%	100%	100%	100%	100.0%
Kivihili	86.5%	94.04%	99%	40%	32.2%
Maakaasu	92%	94%	94%	46%	37.3%
Raakaöljy	93%	82.5%	98%	40%	30.0%
Biokaasu	51%		86.5%	75%	33.0%
CO <sub>2</sub> -päästöt	92%	94%	94%	60%	48.7%

KUVA 22. Hiilen, maakaasun, öljyn ja biokaasun hyötysuhteita. (Sheng, Viswanath, Sharp, Bo 2018, muokattu)

Lasketaan vielä kuvan 22 mukaan valmisteluhyötysuhde maa- ja biokaasulle, ilman voimalaa, sillä tarkastellaan kaasun suoraa käyttöä.

$$\eta_{valm.maakaasu} = 0,92 \cdot 0,94 \cdot 0,94 \cdot 100\% = 81 \%$$

$$\eta_{valm.biokaasu} = 0,51 \cdot 0,865 \cdot 100\% = 44 \%$$

Biokaasun tuotto mädättämällä on prosessin luonteen takia heikompi hyötysuhteeltaan, mutta siitä saadaan talteen energiaa hukkaan menevästä tavarasta. Vaikka hyötysuhde on heikko, se ei välttämättä tarkoita sitä, että prosessiin kuluisi paljon energiaa, vaan kaikkea jätteen energiasisältöä ei saada muutettua juuri metaaniksi. Biokaasun kuljetushyötysuhde on todennäköisesti heikompi jätteiden kuljetusten mukaan ottamisen takia, joita muutenkin kuljetettaisiin kaatopaikoille.

## 6 SÄHKÖNTUOTANTOMENETELMIEN KOKONAISHYÖTYSUHDE

Luvussa tarkastellaan valmiita tuloksia sähköntuotantomenetelmien kokonaishyötysuhteista. Taulukossa 2 on työssä käsiteltävien raaka-aineiden voimalatyypit ja niiden hyötysuhteet sekä arvioidut nimellistehot Suomessa. Sähköntuotantolaitokset sijaitsevat Suomessa hyvin hajanaisesti ja sähkönkäyttöpaikkaa voidaan yleisesti pitää satunnaisena, joten tässä yhteydessä voidaan käyttää yleistä 2 % siirtohäviötä, joka Suomen energiankulutustilastoissa hyvin yleisesti ilmenee.

TAULUKKO 2. Sähkövoimalaitosten hyötysuhteita. (Hartmut, Meier, Offermann & Langnickel 2003; US EPA)

Sähkövoimalaitos	Hyötysuhde $\eta_{\text{voimala}}$ (%)	Käyttöenergia	Teho (MW)
Höyryturbiinivoimala	38–44	Öljy, Kivihiili, Bio-massa	160–570
Kaasuturbiinivoimala	39–47	Kaasut	50–200
Ydinvoimala	33–36	Uraani	500–1500
Tuulivoimala	35	Tuuli	<1–6
Vesivoimala	90–95	Vesi	<1–196
Elektrolyysi + poltto-kenno	24–38 (~31)	Vety	-
CHP-voimala	75 (30 % sähkö + 45 % lämpö)	mm. hiili, biomassat, kaasu	50–200 + 100–300
CCPP-voimala	50	Öljy, kaasu	50–400

### 6.1 Hiilivoima

Kivihiilen prosessi lähtee kaivoksilta, joissa kivihiiltä kaivetaan. Sitä ei kuitenkaan ole otettu huomioon kuvan mukaisesta lähteestä sen laskemisen hankaluuden tai pienen energiankulutuksen vuoksi. Lisäksi kaivuutöistä saadaan useasti monia muita raaka-aineita, mikä voi vaikuttaa kaivuutyön laskemisen pois jättämiseen. Verrataan luvun 5.2 kuvaa 22 ja alla olevaa kuvaa 23 keskenään, joissa kuvataan vaiheittain hyötysuhteet tuotantoketjun eri vaiheista.



### Liuottimella puhdistetut hiilen kiinteät aineet

Kaivuu	—
Kuljetus	100.0
Murskaaminen	100.0
Peseminen	96.8
Liuottaminen	72.7
Jakelu	98.0
Yhteensä	68.9

Hyötysuhde 59.5%

KUVA 23. Kiinteän kivihiilen prosessivaiheiden hyötysuhteita. (Pimentel 1980, muokattu)

Kuljetus tapahtuu todennäköisesti kuljettimilla, jossa kulutus on vähäistä. Putsaus ja jakelu toimii energiatehokkaasti, mutta liuottaminen heikentää merkittävästi arvoja. Lasketaan kivihiilen kokonaishyötysuhde kaavalla 9 kuvien 22 ja 23 mukaan, kun siirtohäviöt ovat Suomessa noin 2 % luokkaa ja taulukon 2 mukaan hiilivoimalan keskimääräinen hyötysuhde on noin 40 %.

$$\eta_{kok.} = \eta_{valm.} \cdot \eta_{siirtohäviö} \cdot \eta_{voimala} \cdot 100\% \quad (9)$$

$$\eta_{kok.hiili(2018)} = (0,865 \cdot 0,94 \cdot 0,99) \cdot 0,98 \cdot 0,4 \cdot 100 \% = 32 \% \quad (9)$$

$$\eta_{kok.hiili(1980)} = 0,595 \cdot 0,4 \cdot 0,98 \cdot 100 \% = 23 \% \quad (9)$$

Tuloksissa huomataan 21 prosenttiyksikön hyötysuhde-ero valmisteluissa. Kuvien 22 ja 23 (Sheng ym. 2018; Pimentel 1980) julkaisujen välillä on melkein 30 vuotta eroa, jonka aikana tekniikat ovat kehittyneet. Isoin ero lähteiden välillä on tullut hiilen prosessoinnista, joissa keskinäinen ero on 24 prosenttiyksikköä. Hiilen prosessoinnin parantamisesta on kirjottanut muun muassa Durocher D.B artikkelissaan ”Cleaner coal”. Perusteet uudempaan lähteen käyttöön on, joten käytetään 80,5 prosentin valmisteluhyötysuhdetta sekä kokonaishyötysuhdetta 31,5 % tuloksissa.

## 6.2 Ydinvoima

Ydinvoimaan tarvittavan uraanin prosessointiin kuluva energiankulutus ei vaihe vaiheelta ole juuri mistään löytynyt. Tiedossa on kuitenkin se, että uraanin valmistus on monivaiheinen prosessi, jolloin se todennäköisesti kuluttaa resursseja. PEF- luvuista on tehty tilastoja (Saprunov 2017) ja päästöttilastoja on tutkittu vaiheittain päästöjen osalta, josta voidaan tehdä seuraavia päätelmiä.

Uraania kaivavien kaivosten keskimääräinen uraanipitoisuus malmista on 0,15 prosenttia, joka tarkoittaa malmikiloa kohden 1,5 grammaa. Kun voimalan rakentaminen ja purkaminen jätetään pois, on 0,15 % uraanipitoisuuden malmin kaivuu ja prosessointi voimalassa tuotettua sähkökilowattituntia kohti tuottanut 40 gCO<sub>2</sub>. Uraanin ydinreaktiosta ei päästöjä synny, joten jäljelle jää uraanin jatkokäsittely. Jatkokäsittelyn päästöt on arvioitu olevan noin 17 g tuotettua sähkökilowattituntia kohti. Yhteensä tämä tarkoittaa 57 g päästöjä käyttötilanteessa tuotettua sähkökilowattituntia kohti. (Van Leeuwen 2006)

Voidaanko tätä tietoa käyttää hyväksi energiankulutuksessa? Taulukossa 1 on tietoja polttoaineiden ominaisuuksista, josta laajempi versio löytyy ”The engineering toolbox”- verkkosivuilta. Huomataan, että polttoaineiden energiasisällöt massaa kohti ovat samaa suuruusluokkaa, myös päästöt polttoaineesta saatavaa kilowattituntia kohti ovat 70 g:n toleranssin sisällä. Päästöt koostuvat todennäköisesti juuri näiden polttoaineiden moottori- tai sähkönkäyttöistä (sähkötuotanto). Tämä mittari ei ota huomioon päästötöntä energiankäyttöä, mutta sitä on suhteellisesti vähän käytössä maailmalla toistaiseksi.

Taulukoita tutkiessa voidaan todeta 250 g:n hiilidioksidipäästöjen kilowattituntia kohti olevan keskiarvo. Jotta saadaan energia tulokseksi, pitää hiilidioksidi laskea yksiköistä pois kaavalla 10.

$$Kulutettu\ energia = \frac{päästöt\ tuotantovaiheessa}{keskiarvopäästö\ polttoaineilla} \quad (10)$$

$$E_{uraani} = \frac{57\ gCO_2}{250\ gCO_2/kWh} = 0,228\ kWh \quad (10)$$

Tulos kertoo, että noin 0,23 kWh kuluu uraanin valmisteluihin tuotettua sähkökilowattituntia kohti. Valmiista U-235 kilosta saadaan taulukon 1 mukaisesti 24 GWh, jolloin se pitää muuntaa ensin voimalan hyötysuhteen avulla sähköenergiaksi. Lasketaan siis valmisteluihin kulutettu energia ja valmisteluvaiheen hyötysuhde käyttäen apuna rikastetun uraanin ominaisenergiaa, kun se on tuotettu voimalassa sähköenergiaksi taulukon 2 hyötysuhteilla.

$$\begin{aligned}
 \text{Uraanista saatava sähköenergia} &= 24 \text{ GWh} \cdot 0,4 = 8,5 \text{ GWh} \\
 \text{Kulutettu energia} &= 8,5 \text{ GWh} \cdot 0,226 \text{ kWh} = 1,9 \text{ GWh} \\
 \eta_{\text{valm.uraani}} &= \frac{8,5 \text{ GWh} - 1,9 \text{ GWh}}{8,5 \text{ GWh}} \cdot 100 \% = 77 \% \quad (10)
 \end{aligned}$$

Lasketaan energiatuotannon kokonaishyötysuhde, kun tyypillisen ydinvoimalan hyötysuhde on noin 40 % (taulukko 2), josta sähköenergia siirretään sähköverkkojen kautta käyttäjille sähkönsiirtohäviöiden ollessa noin kaksi prosenttia. Tästä saadaan kokonaishyötysuhde seuraavalla laskulla.

$$\eta_{\text{kok.uraani}} = 0,77 \cdot 0,4 \cdot 0,98 \cdot 100\% = 30\% \quad (9)$$

Tuloksesta huomataan voimalan hyötysuhteen pudottavan eniten kokonaishyötysuhdetta. Valmistelun hyötysuhteen huomataan olevan samaa luokkaa kuin muiden polttoaineiden.

### 6.3 Tuuli- ja vesivoima

Tuuli- ja vesivoiman kokonaishyötysuhteen laskeminen on yksinkertaista, mutta mielipiteitä jakavaa. Energiansaanti on periaatteessa ilmaista, sillä sen hankkiminen ei energiaa vie, mutta valmistelut vievät. Valmistelut muissakin energiantuotantomenetelmissä jätettiin pois, joten jäljelle näissä tapauksissa jää voimaloiden hyötysuhteet ja sähkönsiirtohäviöt käyttöpisteisiin. Tuulivoimaloiden tyypillinen hyötysuhde on 35 prosentin molemmin puolin riippuen tuulen vrt. turbiinin pyörimisnopeudesta. Vastaava hyötysuhde vesivoimalla on noin 90 %.

Tulos saadaan kaavalla 9, josta jätetään pois energian valmisteluhyötysuhde, sillä niitä ei ole.

$$\eta_{kok.tuuli} = 0,35 \cdot 0,98 \cdot 100\% = 34 \% \quad (9)$$

$$\eta_{kok.vesi} = 0,9 \cdot 0,98 \cdot 100\% = 88 \% \quad (9)$$

## 6.4 Vety

Vetykaasun tuottaminen lähtee vedestä, missä elektrolyysin avulla irrotetaan vety vedestä sähkövirran avulla. Tämän prosessin hyötysuhde on nykyään 60–70 % ilman lämmöntalteenottoa. Mikäli sähköntuotantolaitos on lähellä, kuten päästötömän vedyn tuotannossa on tarkoituksena, ovat tehohäviöt sähkönsiirrossa hyvin pienet kokonaisuuteen nähden. Vety muutetaan takaisin sähköksi polttokennoilla, joiden hyötysuhde on nykyään 40–55 %. (Vartiainen 2020)

Lasketaan vetytuotannon kokonaishyötysuhde, josta jätetään siirtohäviöt pois. Sähköntuotantoesimerkkeinä tuulivoima, kun sähkö on muunnettu vedyksi ja vety takaisin sähköksi.

$$\eta_{kok.vety} = \eta_{elektrolyysi} \cdot \eta_{polttokenno} = 0,65 \cdot 0,48 \cdot 100\% = 31 \%$$

$$\eta_{vetytuulituotanto} = \eta_{tuulivoimala} \cdot \eta_{kok.vety} = 0,35 \cdot 0,31 \cdot 100\% = 11 \%$$

Keskimääräiseksi kokonaishyötysuhteeksi vedylle tulee noin 31 % ilman sähkövoimalan hyötysuhdetta. Elektrolyysivetytuotanto tuulivoimalaesimerkin kanssa antaa kokonaishyötysuhteeksi noin 11 %.

## 6.5 Maa- ja biokaasu

Kaasua voidaan käyttää polttoaineena tai energiantuotannossa, joten tarkastellaan myös sähköntuotantoa kaasulla. Tässä pätee valmistelu-, voimala- ja sähkönsiirtohyötysuhteen tulo. Tiedot saadaan luvusta 5.2, mutta käytetään samankaltaisia kaasuturbiinivoimaloita verrokkina sekä maa- että biokaasulla, sillä kuvan 21 voimalassa on otettu mukaan lämmöntalteenotto biokaasulla.

$$\eta_{kok.maakaasu} = (0,92 \cdot 0,94 \cdot 0,94) \cdot 0,4 \cdot 0,98 \cdot 100\% = 32 \% \quad (9)$$

$$\eta_{kok.biokaasu} = (0,51 \cdot 0,865) \cdot 0,4 \cdot 0,98 \cdot 100\% = 17 \% \quad (9)$$

Kuten luvussa 5.2 todettiin, biokaasun tuotantotyyppin ja jätteiden kuljetuksen takia valmisteluhyötysuhde on heikompi, minkä takia kokonaishyötysuhteet ovat tulosten kaltaisia.

## 7 TULOKSET

### 7.1 Raaka-aineesta valmiiksi energiaksi

Edellisten lukujen mukaan saadaan taulukon 3 mukainen tulos, jossa toisessa sarakkeessa on raaka-aineen valmistuksen hyötysuhde. Kolmannessa sarakkeessa on taulukon 2 mukaiset sähkövoimaloiden hyötysuhteet sähkösiirtohäviöineen. Dieselin ja bensiinin hyötysuhdetta verrataan niistä saatavaan lämpöenergiaan, kuten maa- ja biokaasussakin. Maa- ja biokaasulla tuotetaan myös sähköä, joten niitä verrataan sekä sähkö- että lämpöenergiaan. Muiden aineiden osalta puhutaan pelkästään sähköenergiasta ( $\text{kWh}_e$ ), koska ne käyvät voimალavaiheen. Toiseksi viimeisessä sarakkeessa on aineeseen kulutettu energia kilogrammaa kohden, mikä on valmistuksen hyötysuhteeseen jäävän prosenttimäärän tulo (esim. bensiini:  $(100 \% - 88 \%) \cdot 12,9 \text{ kWh} = 1,5 \text{ kWh}$ ). Vaikka aikaisemmin asiaa on käsitelty hyötysuhteena eli kulutettua energiaa on vähennetty aineen ominaisenergiasta, on energia oikeasti peräisin kyseisen aineen ulkopuolelta. Kulutetut energiat voi toisaalta sisältää kaasuntuotannon kaasuvuotojen kaltaista häviöenergiaa, joka vaikutti hyötysuhteeseen. Viimeisessä sarakkeessa on energia, joka saadaan raaka-aineesta sellaisenaan tai voimalan kautta.

TAULUKKO 3. Raaka-aineesta valmiiksi energiaksi hyötysuhteita.

Aine	$\eta_{\text{valm.}}$ (%)	$\eta_{\text{voimala}}$ $\eta_{\text{sähkönsiirto}}$ (%)	$\eta_{\text{kok.}}$ (%)	Aineeseen kulutettu ulkopuolinen energia $((100 \% - \eta_{\text{valm}}) \cdot W_{\text{aine}})$	Aineesta saatava energia $W_{\text{aine}} / W_{\text{aine}} \cdot \eta_{\text{voimala}}$
Bensiini	88	-	88	1,5 kWh/kg	12,9 kWh/kg
Diesel	88	-	88	1,4 kWh/kg	12,7 kWh/kg
Maakaasu	81	- (39)	81 (32)	2,9 kWh/kg	15,4 kWh/kg (6 kWh <sub>e</sub> /kg)
Biokaasu	44	- (39)	44 (33)	0 (8,6 kWh/kg*)	15,4 kWh/kg (6 kWh <sub>e</sub> /kg)
Kivihiili	81	39	32	1,33 kWh/kg	2,7 kWh <sub>e</sub> /kg
Uraani	77	39	30	$1,9 \times 10^6$ kWh/kg	$9,4 \times 10^6$ kWh <sub>e</sub> /kg
Vesi	100	88	88	0	0,89 kWh <sub>e</sub> / 1 kWh
Tuuli	100	34	34	0	0,34 kWh <sub>e</sub> / 1 kWh
Vety	65	46	30	11,6 kWh/kg	15,2 kWh <sub>e</sub> /kg
Puu	90	39	35	0,45 kWh/kg	2,7 kWh <sub>e</sub> /kg

Neljäs sarake eli kokonaishyötysuhde kertoo suhteellisen lukumäärän jäljelle jäävästä energiasta, kun raaka-aineeseen kulutettua sekä häviöihin kuluva energia on aineen ominaisenergiasta vähennetty. Periaatteessa jäljelle jää energia, jota ei ole vielä energianlähteestä käytetty. Sähköntuotannolla se tarkoittaa sähköenergiaa ja polttoainetuotannolla lämpöenergiaa. Sähköä voidaan käyttää useissa kohteissa, kuten elektroniikassa, pumpuissa, sähkömoottoreissa ja lämmityksessä. Sähkölämmityksessä tosin hyötysuhde tarjoaa heikompaa lukua. Katsotaan esimerkiksi maakaasun käytön arvoja: lukujen mukaan on 2,5-kertaisesti energiatehokkaampaa käyttää kaasua lämmitykseen kuin valmistaa kaasulla sähköä, jota käytettäisiin lämmitykseen.

Suurin osa energiasta häviää voimalatuotannossa, jossa hukkaa menee lämpöhäviöihin, savukaasuihin tai ohikulkevaan kineettiseen energiaan. Raaka-aineiden valmistuksessa kuluu energiaa noin viidennesosasta kolmannesosaan aineen ominaisenergiasta. Energiamenekit koostuvat suurimmaksi osaksi prosesseista eikä niinkään kuljetuksista. Biokaasun, veden, tuulen ja vedyn osalta energia tulee ikään kuin ympäristön tarjoamana, joten energiansaanti tulee hukkaenergiasta, jota ei muuten otettaisi talteen. Tällöin siis energiaan ei tarvitse kuluttaa resursseja, jolloin saatava energia on pelkästään nettoenergiaa. Vaikka vedyn valmistuksen kokonaishyötysuhde on heikko, se toimii energiavarastona, kun suoralle sähkönkäytölle ei ole uusiutuvista lähteistä tarvetta.

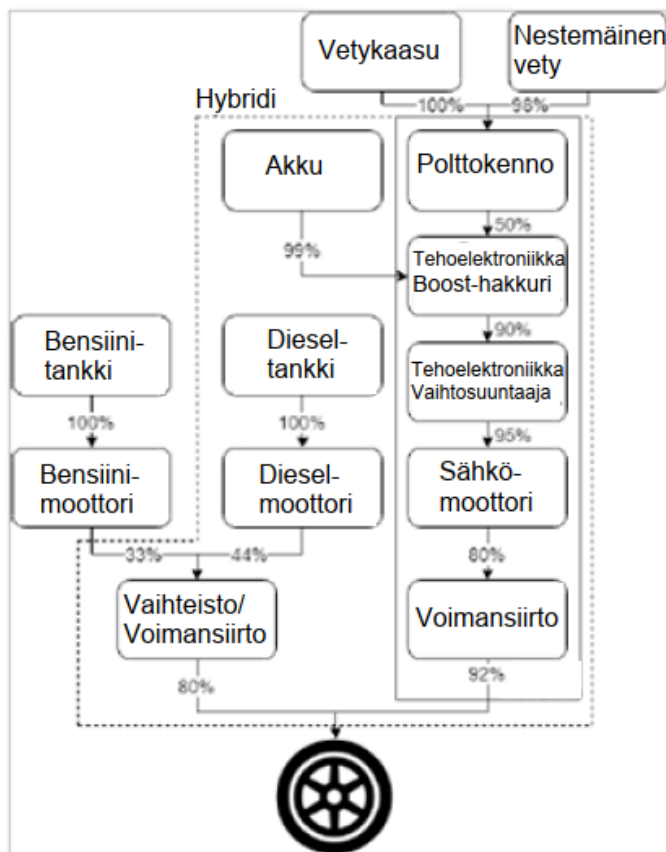
Mitä enemmän raaka-aineita joudutaan käsittelemään ja käyttämään prosesseissa, sitä enemmän aineen hyötysuhde heikkenee. Vety käy kaksi kertaa kemiallisen prosessin, josta syntyy sivutuotteena lämpöä hukaten siihen käytettyä energiaa. Uraani käy monivaiheisen käsittelyn, minkä jälkeen se muunnetaan fissioreaktiolla ydinvoimalassa edelleen heikentäen hyötysuhdetta. Muut fossiiliset polttoaineet käyvät myös prosesseja läpi, ennen kuin ne muunnetaan voimalassa sähköksi. Tämä huomataan suhteellisen pienestä sähköenergiamäärästä verrattuna aineen ominaisenergiaan, mikä on yleensä noin kolmasosan lukuun ottamatta vesivoimaa.

Voimaloiden hyötysuhteita voidaan kasvattaa huomattavasti lämmöntalteenotolla, joka on ratkaistu kombivoimalaitoksilla (CHP). Kombivoimalaitosten sähkön- ja lämmöntuotanto jakautuu silloin suurin piirtein 30 % ja 45 % (US EPA).

Toisaalta jokaisessa sähköntuotantopaikassa ei hukkalämmölle ole tarvetta. Lisäksi hyötysuhteita voidaan nostaa öljyn- ja kaasunpolttovoimalaitoksilla kombiprosessilla (CCPP), jossa otetaan savukaasuista lämpöenergiaa vielä höyryturbiinin, jolla voidaan saavuttaa 50 % hyötysuhde. Tällöin kokonaishyötysuhteet polttoaineilla paranisivat 4–8 prosenttiyksikköä CCPP-prosessilla ja CHP-prosessilla 10–30 prosenttiyksikköä. Näillä menetelmillä pystytään pienentämään syötöaineiden määrää.

## 7.2 Aineesta ajoneuvon liike-energiaan

Tarkastellaan hyötysuhdetta aineesta liike-energiaan eli sovelletaan saatuja hyötysuhteita ajoneuvojen kanssa. Tämä tarkoittaa ajoneuvon hyötysuhteen, aineen valmistelun sekä mahdollisen voimalahyötysuhteen yhdistämistä. Tulos kertoo, kuinka paljon raaka-aineesta saadaan energiaa lopulta kineettisen energian tuottamiseen. Seuraavasta kuvasta ilmenevät asiat, jotka heikentävät ajoneuvon hyötysuhdetta. Kuvassa 24 on bensiini-, diesel-, vety- ja sähköauton tietoja. Kaasuja voidaan käyttää bensiinimoottoreissa pienillä muutoksilla.



KUVA 24. Ajoneuvotyyppien hyötysuhteita. (Sheng ym. 2017, muokattu)



Polttomoottoreissa hyötysuhdetta heikentävinä tekijöinä ovat ottomoottori, jäähdytysjärjestelmä sekä vaihteisto. Kuvan mukaan bensiiniauton hyötysuhde on 26,4 % ja dieselin 35,2 %, kun tekijät lasketaan yhteen. Sähköä käyttävässä ajoneuvossa akku, tehoelektronikka, sähkömoottori ja voimansiirto vaikuttavat hyötysuhteeseen. Kuvan mukaan sähköautolle tulisi hyötysuhteeksi 56 %, mutta uudempien sähköautojen osalta päästään 70 %:iin energiantalteenoton sekä tekniikan kehittymisen ansiosta (EVSE).

Taulukossa 4 on esitetty hyötysuhteet energianlähteestä liike-energiaan. Maa- ja biokaasua voidaan käyttää voimalatuotannossa sekä suoraan polttomoottorissa. Taulukossa on sulkeissa esitetty sähköntuotannon hyötysuhdeketju sähkömoottoreineen kaasujen osalta. Polttomoottorit käyttäytyvät eri kierrosalueilla eri hyötysuhteella, mutta taulukossa on kuvan 24 tiedoilla laskettu polttomoottoriajoneuvojen keskiarvot sarakkeella 3. Samalla sarakkeella sijaitsee myös sähköautojen hyötysuhteet. Sarakkeella 4 sarakkeella on laskettu koko kiertokulun hyötysuhde kineettiseen energiaan ajoneuvoissa. Kahdella viimeisellä sarakkeella on absoluuttiset energiamäärät esitettynä. Ne kertovat siis aineisiin kulutetun ulkopuolisen energiamäärän sekä valmiista tuotteesta saatavan liike-energian.

Taulukon 4 aine-liike-energiahyötysuhde on laskettu kaavalla 11. Esimerkkinä on laskettu kivihiilituotannon ja sillä tuotetun sähkön osuus ajoneuvon liike-energiaan.

$$\eta_{\text{aine-liike-energia}} = \eta_{\text{kok}} \cdot \eta_{\text{ajoneuvo}} \cdot 100 \% \quad (11)$$

$$\eta_{\text{a-l-e.kivihiili}} = 0,32 \cdot 0,7 \cdot 100\% = 22 \% \quad (11)$$

TAULUKKO 4. Raaka-aineiden hyötysuhde suhteessa ajoneuvon liike-energi-  
aan.

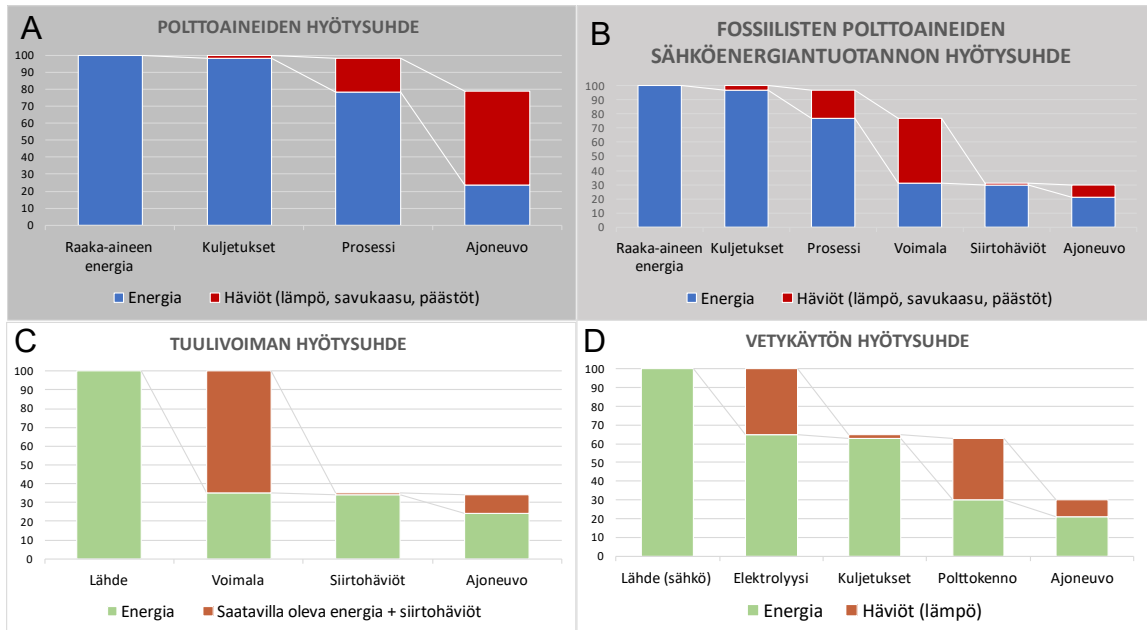
Aine	$\eta_{\text{kok.}}$ (%)	$\eta_{\text{ajoneuvo.}}$ (%)	$\eta_{\text{aine-liike-energia}}$ (%)	Liikkeeseen saatava energia ( $\eta_{\text{ajoneuvo}} \cdot (\eta_{\text{voimala}}) \cdot W_{\text{aine}}$ )	Aineeseen kulutettu ulkopuolinen energia ( $((100 \% - \eta_{\text{valm}}) \cdot W_{\text{aine}})$ )
Bensiini	88	17-35 ~26	23	3,4 kWh/kg	1,5 kWh/kg
Diesel	88	23-48 ~35	31	3,9 kWh/kg	1,4 kWh/kg
Maa- kaasu	81 (32)	25-45 ~28 (70)	23 (23)	4,3 kWh/kg (4,2 kWh/kg)	2,9 kWh/kg
Bio- kaasu	44 (17)	25-45 ~28 (70)	12 (12)	4,3 kWh/kg (4,2 kWh/kg)	0 (8,6 kWh/kg*)
Kivihiili	32	70	22	1,9 kWh/kg	1,33 kWh/kg
Uraani	30	70	21	$6,6 \times 10^6$ kWh/kg	$1,9 \times 10^6$ kWh/kg
Vesi	89	70	62	0,62 kWh/kWh <sub>e</sub>	0
Tuuli	34	70	24	0,24 kWh/kWh <sub>e</sub>	0
Vety	30	70	21	10,6 kWh/kg	11,6 kWh/kg
Puu	35	70	25	1,2 kWh/kg	0,45 kWh/kg

Kaasutuotannon osalta tulos on lähes sama huolimatta siitä, onko kaasu tehty voimalassa sähköksi vai kaasu poltettu suoraan polttomoottorissa. Vetytuotannon osalta tarkastelu lähti sähköstä eli siihen laskettaisiin vielä lisäksi tuotantotavan hyötysuhde, joka oli laskettu luvussa 6.4. Vaikka suoraan polttomoottorikäyttöön ei voimalahyötysuhteita lasketa, kompensoi sähköauton parempi hyötysuhde sähkönkäytön aine-liike-energia- hyötysuhdetta paremmaksi kuin bensiinin ja lähemmäksi dieselikäytön hyötysuhdetta.

Mitä lähempänä prosentit ovat nollaa, sitä heikompi energiatehokkuus aineella on. Esimerkiksi kivihiilikilosta saadaan seitsemän kilowattituntia. Kivihiilen prosessoinnin, kuljettamisen, voimalassa sähköksi ja sähköautossa liikkeeksi muuttamisen jälkeen, liike-energiiaan jää 25 % alkuperäisestä energiasta. Näin ajoneuville jäi 1,75 kWh, valmisteluihin 1,33 kWh ja loput häviöihin eli 3,9 kWh. Taulukon 4 kahta viimeistä saraketta lukiessa voidaan todeta muiden raaka-aineiden osalta se, että monenkaan kohdalla ei voida puhua hyvästä energiatehokkuudesta esim. maakaasu ja vety. Ideaalitilanne olisi mahdollisimman minimaali-

nen määrä kulutettua energiaa aineisiin, josta saataisiin liki aineen ominais määrän verran liike-energiaa. Vaikka kokonaishyötysuhteet ovat uusiutuviissa heikkoja, huomataan saadun nettoenergian osuuden olevan 100 %.

Havainnollistetaan lukuja vielä kuviolla 1, josta saadaan parempi käsitys kiertokulusta ja vaiheista, joissa energiaa jää hukkaan. Kuvion 1 A ja B taulukossa on polttoaineiden keskiarvokaaviot.



KUVIO 1. A: Maakaasun, bensiinin ja dieselin suoran polttomoottorikäytön keskiarvot. B: Fossiilisten sähköntuotantotapojen keskiarvo. Tuulivoima (C) ja vetykäyttö (D).

Kuviot paloittelevat hyvin kiertokulun energiahäviöitä ja antaa kuvaavamman käsityksen eri vaiheista. Kuvioista huomataan heikkouksia olevan voimalat ja ajoneuvot. Prosessin energiankulutukseen sekä liike-energiaan jääviä määriä kannattaa tarkastella. Kineettiseen energiaan jää hyvin yleisesti noin 20 %, joka lähentelee maakaasun, vedyn ja kivihiilen valmisteluihin kuluvaan energiahävikkiä. Toisaalta vetytuotanto pyritään suorittamaan tuuli- ja aurinkosähköllä, mutta fossiilisten polttoaineiden osalta puhutaan melko vähäisestä energiasta, kuin mitä niistä voitaisiin saada.

### 7.3 Päästötarkastelu

Tarkastellaan ajoneuvokäytössä syntyvien hiilidioksidipäästöjen määriä kilometriä kohden, kun ajoneuvon energiavaade kilometrille on 150 Wh. Taulukossa 5 on tähdillä merkattu poikkeukset uusiutuvien energialähteiden osalta. Uusiutuvat polttoaineet on määritelty nykyään hiilineutraaleiksi, vaikka niiden käytöstä syntyisikin päästöjä. Vastapaino syntyviin päästöihin löytyy uusiutuvien polttoaineiden elinkaaren ominaisuuksista, sillä ne sitovat itseensä saman verran hiilidioksidia kuin niitä käytettäessä syntyy. Taulukossa on kuitenkin otettu huomioon niiden valmisteluissa syntyvät päästöt. Muiden ei-uusiutuvien aineiden osalta otetaan huomioon koko elinkaaren aikaiset ja niiden ominaishiilidioksidipäästöt käytössä. Bensiinin ja dieselin osalta kilowattitunnit ovat lämpöarvoja, kun muissa ne on ilmoitettu sähköenergian muodossa. Bensiinin ja dieselin osalta on merkattu + -merkillä niiden ominaispäästöt ilman hiukkassuodatusta.

Taulukon 5 laskelmat ovat laskettu seuraavan kaavan mukaisesti. Esimerkkinä bensiinikäytön lasku (kaava 12).

$$\begin{aligned} \text{Hiilidioksidipäästöt}/\text{km} &= \frac{1}{\text{moot. hyötysuhde}} \cdot 0,15 \text{ kWh} \cdot \text{gCO}_2/\text{kWh}_{\text{aine}} \quad (12) \\ &= \frac{1}{0,264} \cdot 0,15 \text{ kWh} \cdot 327 \text{ gCO}_2/\text{kWh} = 182 \text{ gCO}_2 \end{aligned}$$

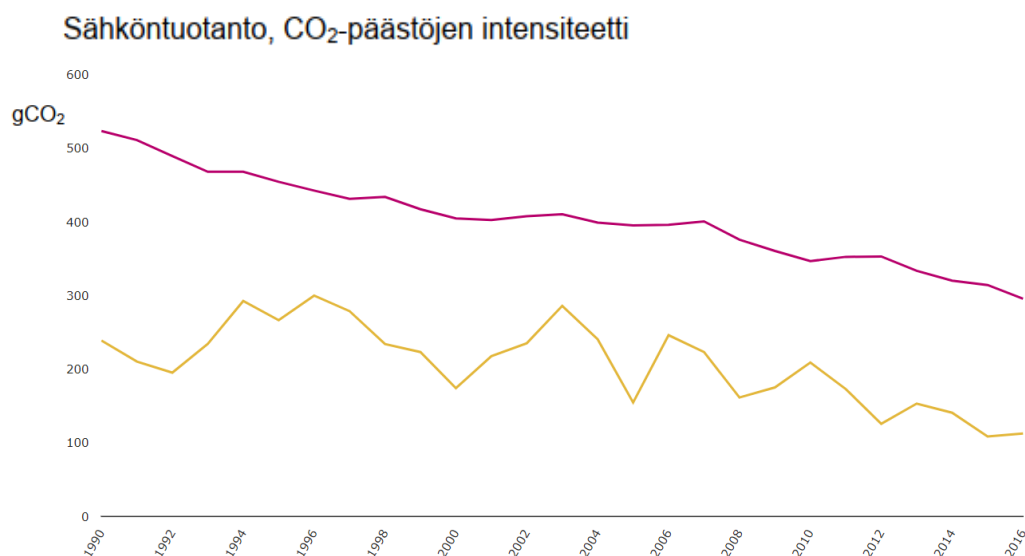
Laskussa moottorin hyötysuhteen käänteisluvun avulla saadaan laskettua, kuinka paljon energiaa vaaditaan 150 Wh liike-energian tuottamiseen. Tämä luku kerrotaan 150 Wh:lla, sekä aineen ominaispäästöllä.

TAULUKKO 5. Hiilidioksidipäästöjen tarkastelua. (Innovation origins, Sheng ym. 2017)

Aine	Moottorin hyötysuhde %	Prosessin ja tuotannon yhteispäästöt gCO <sub>2</sub> /kWh	Päästöt kilometriä kohden gCO <sub>2</sub> /km
Bensiini	17-35 ~26,4	77 + 250	182
Diesel	23-48 ~35,2	60 + 260	136
Maakaasu	70	595	128
Biokaasu	70	78*	17
Kivihiili	70	918	197
Uraani	70	57	13
Vesi	70	0	0
Tuuli	70	0	0
Vety	70	0	0
Puu	70	55*	13

Saman energiamäärän käyttäminen sähkö- ja polttomoottorin osalta on hieman vääristävää, sillä sähköautojen akut tuovat hieman lisäpainoa. Ratkaisevaa eroa ei kuitenkaan siitä tule. Energiahyötysuhteella ja päästöjen määrällä tuotantovaiheessa ei välttämättä ole suoraa yhteyttä päästökaasujen suodatuksen vuoksi. Lisäksi soihdutus maakaasu- ja öljytuotannolla kasvattaa päästöjen määrää, mutta se ei välttämättä näy energiankulutuksissa.

Tuloksissa huomataan sähköntuotantomenetelmällä olevan iso merkitys siihen, kuinka ison hiilidioksidipäästön ajoneuvo jättää jälkeensä. Varsinkin, kun sähköajoneuvon energiavaade on hieman suurempi ja polttomoottoreiden todelliset päästömäärät hiukkassuodatuksensa ansiosta eivät ole niin suuria (hiilidioksidisuodatusprosenttia ei saatu lähteistä). Katsotaan energiantuotannon keskimääräisiä hiilidioksidipäästöjä voimaloissa Suomessa sekä Euroopassa kuvasta 25.



KUVA 25. Euroopan (pun.) ja Suomen (kelt.) hiilidioksidipäästökehitys voimaloissa ajalla 1990–2016. (EEA, muokattu)

Suomessa sähköntuotannon keskimääräinen hiilidioksidiarvo tuotettua sähkökilowattituntia kohti vuonna 2016 oli 113 g, Euroopan 296 g ja maailman 400–500 g. Nämä ilmoitetut luvut eivät todennäköisesti ole absoluuttisia, vaan näissä luvuissa käytetään hiilineutraalia määritelmää uusiutuviissa energiantuotantomenetelmissä. Lisäksi ilmoitetut luvut eivät kerro koko tuotantoketjun elinkaaren päästöjä vaan pelkästään voimaloiden käyttötilanteen päästöt. Edellä mainittujen alueiden päästöt täyssähköautolle olisivat kuvan tietojen perusteella, kaavalla 12 laskettuna 24, 61, ja 92 gCO<sub>2</sub>. Mikäli lukuihin sisältyisi absoluuttiset päästöt sekä tuotantoketjujen aiheuttamat päästöt, olisivat luvut suurempia.

## 8 POHDINTA

Hyötysuhde- ja hiilidioksidipäästölaskumenetelmiä on monia riippuen siitä, mistä asti energiankulutuksia ja päästöjä aletaan huomioida. Niitä voidaan alkaa laskea esimerkiksi voimaloiden, kuljetuksissa tarvittavien laivojen, putkistojen ja kaivosten rakentamisvaiheista saakka käyttöön asti, raaka-ainevaiheesta tankkiin asti ja niin edelleen. Tässä työssä huomioitiin käyttötilanne, joka tarkoitti raaka-aineesta tankkiin ja tankista ajoneuvon liikuttamiseen eli rakennusvaiheet jätettiin pois tarkastelusta. Esimerkiksi tietoa siitä, kuinka paljon hiilivoimainfran rakentamiseen kaivoksilta tuotantolaitoksiin saakka kuluvalle energialla rakennettaisiin tuulivoimaloita, on vaikeaa arvioida.

Työssä käyttötilanteen hyötysuhteiden tarkastelua olisi voitu laskea käsin enemmänkin, mikäli tarkempaa tietoa tuotannon eri vaiheista olisi ollut saatavilla. Tällä kertaa riittävän tarkkaa tietoa saatiin öljytuotannosta, josta laskettu tulos oli hyvin lähellä lähteitä vastaavia (Rosoff 2011; Sheng ym. 2017). Tosin raaka-ainesirrot suoritettiin yllättävän pienellä energiahäviöillä, huolimatta satojen kilometrien matkoista ja mahdollisesta lämmön ylläpidosta. Tietoa kuitenkin tämänkaltaisesta laskentaperiaatteesta löytyi riittävästi valmiiksi laskettuna, jolloin voitiin toteuttaa suunniteltu vertailu yleisimmillä polttoaine- ja sähköntuotantomenetelmillä. Muutakin tilastoa löytyi jonkin verran, mutta omalla otannalla tieto oli suurimmaksi osaksi perusteleamatonta. Hyviksi koettujen lähteiden tuloksissa oli hieman eroja, mutta suuruusluokka oli samaa. Erot selittyivät hyvin pitkälti alueellisilla eroilla, esimerkiksi öljynjalostus Suomessa oli toteutettu keskimääräistä paremmin kuten myös puuenergia. Tarkemmat tulokset saataisiin Nesteen ympäristöluvan kaltaisilla tiedoilla, mitkä jäivät puuttumaan maakaasun, uraanin, biomassan ja kivihiihlen osalta.

Taulukon 3 tuloksia tarkastellessa huomataan hukkaenergian määrän olevan valtaisa ilman lämmöntalteenottoa. Hukkaenergia perustuu suurimmaksi osaksi lämpö- ja savukaasuhäviöihin. Lämmöllä ei toisin sanoen saada energiatehokkaasti sähköä tuotettua, jolloin lämmöntuotanto kotitalouksissa ja muissa lämpöenergiaa tarvitsevissa kohteissa olisi energiatehokkaampaa kuin voimaloissa. Kuitenkin voimaloissa tuotannon ohella syntyvät päästöt pyritään suodattamaan,

mutta esimerkiksi kotitalouksissa sitä ei välttämättä tehdä. Saavutettaisiinko energiatehokkuus paikallisella lämmittämällä siis hiilidioksidipäästöjen kustannuksella vai olisiko se parempi ratkaisu, kuin voimalassa tuotetulla sähköllä lämmittäminen?

Taulukon 4 sekä kuvion 1 tiedot kertovat moottoreiden ja voimaloiden hyötysuhteiden olevan heikentävimpiä tekijöitä tuotannon elinkaarissa. Parannuksia on kuitenkin tullut voimaloiden hyötysuhteisiin uusien tekniikoiden myötä, mutta polttomoottoreiden osalta ollaan vielä matalissa hyötysuhteissa. Huomiota kiinnittävä asia on raaka-aineiden valmisteluihin kuluva energiamäärä, joka voi olla hyvin lähellä ajoneuvoja liikuttavaa energiamäärää. Mikäli ne olisivat samat, energiahyöty olisi vain yhden suhde yhteen, jolloin nettoenergian määrä olisi käytännössä nolla. Ideaalitilannehan olisi netota kaikki aineen ominaisenergia liikkeeseen.

Jostakin energiaa on saatava, jolloin sitä hankitaan sieltä mistä järkeviä määriä saadaan. Tulosten mukaan raaka-aineiden energiaa käytetään kuitenkin erittäin heikosti kuten taulukot näyttävät. Luvut näyttävät suhteellisen hyviltä raaka-aineista käytettävään energiamuotoon asti. Hyötysuhteiden kertautuessa voimalakäyttöjen jälkeen jäljelle jää enää kolmasosan verran alkuperäisestä energiasta yksinomaan fossiilisen sähköntuotannon osalta. Tulokset heikkenevät edelleen ajoneuvokäytöissä, missä netotto liike-energiämäärä on hyvin pieni, mikä vastaa fossiilisilla sähköntuotantomenetelmillä melkein raaka-aineisiin käytettyä energiaa.

Parhain energiatehokkuus tulee niistä, missä energian hankkimiseen ei ole tarvittu käyttää resursseja. Työssä tämä toteutuu vesi- ja tuulivoiman sekä biokaasun osalta. Niissä nettoenergian osuus käyttötilanteessa on 100 %. Yleisen päästötarkastelun sijaan, olisi enemmän kiinnitettävä huomiota energiatehokkuuteen, jonka vaikutus olisi paljon suurempi. Mikäli energialähteistä saataisiin isompi osa energiaa talteen käytettäväksi, niiden tarve olisi paljon pienempi. Tämä tarkoittaisi eri menetelmien kohdentamista tiettyyn käyttötarkoitukseen, mitä voisi olla esimerkiksi sähkön käytön maksimoiminen pyörivään/liike-energiin ja raaka-aineiden lämpöenergian käyttö lämpöä tarvitseviin tarkoituksiin.



Myös CCPP- ja CHP-voimaloilla päästään parempaan energiatehokkuuteen, kuten tuloksissa todettiin, vaikka sähkön tuoton osuus pienenee yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa. CHP-voimaloita on ainakin Suomessa käytössä laajasti, mutta CCPP-voimaloiden laajuudesta ei löytynyt tietoa. Fossiilisen sähkön- tuotannon osalta hyötysuhteita heikentäisi edelleen heikompi sähkönsiirron hyötysuhde, sillä useissa maissa hyötysuhteet ovat alle 90 %.

## LÄHTEET

Alakangas, E. Hurskainen, M. Laatikainen-Luntama, J. Korhonen, J. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Kuva 8.

<https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2016/T258.pdf>

Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Valtion teknillinen tutkimuskeskus (Motiva). Taulukko 1.

<https://www.motiva.fi/files/685/t2045.pdf>

Bioenergia. Pellettienergia. Luettu 11.4.2021. Kuva 16.

<https://www.bioenergia.fi/tietopankki/pellettienergia/>

Bright hub engineering. How does a coal power plant work? Luettu 19.4.2021. Kuva 9.

<https://www.brighthouseengineering.com/power-plants/18082-coal-fired-thermal-power-plant-the-basic-steps-and-facts/>

CME group. A Look into the Refining Process. Luettu 23.3.2021. Kuva 6.

<https://www.cmegroup.com/education/courses/introduction-to-refined-products/a-look-into-the-refining-process.html>

Con Edison. How We Source Our Electricity. Kuva 4. Luettu 23.3.2021.

<https://www.coned.com/en/our-energy-future/how-we-source-our-energy/electricity>

Doosan. Fuel Cell: Doosan Mobility Innovation. Luettu 23.3.2021. Kuva 14.

[https://www.doosanmobility.com/en/technology/tech\\_01/](https://www.doosanmobility.com/en/technology/tech_01/)

Durocher D.B. Cleaner coal: Improving energy efficiency at a coal preparation plant in Western Canada. 2015. pdf.

EEA. CO2 emission intensity. Luettu 14.4.2021. Kuva 25.

<https://www.eea.europa.eu/>

Energy resources of Australia. Uranium processing at ranger mine. Luettu 29.3.2021. Kuva 10.

[https://www.energyres.com.au/uploads/docs/Uranium\\_Processing\\_factsheet\\_FA3\\_FINAL.pdf](https://www.energyres.com.au/uploads/docs/Uranium_Processing_factsheet_FA3_FINAL.pdf)

Engie. How does gas-fired power work? Luettu 17.4.2021. Kuva 15.

<https://engie.com.au/home/engie-today/education/how-does-gas-fired-power-work/>

EVSE. Tesla Model 3 Charging Efficiency. Luettu 20.4.2021.

<https://evse.com.au/blog/tesla-model-3-charging-efficiency-close-to-10km-kwh-of-charging-and-climbing/>

Google maps. Kartasta laskettu etäisyys.

Heikkilä, S. 2013. Kaupallinen elektrolyysikenno autossa. Auto- ja kuljetustekniikka. Metropolia ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.  
[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/63368/Insinoorityo\\_elekrolyysikenno\\_autossa.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/63368/Insinoorityo_elekrolyysikenno_autossa.pdf?sequence=1)

Innovation origins. Producing gasoline and diesel emits more CO2 than we thought. Luettu 14.4.2021.  
<https://innovationorigins.com/producing-gasoline-and-diesel-emits-more-co2-than-we-thought/>

Hartmut, K. Meier, H.J. Offermann, D. Langnickel, U. 2003. Efficiency in electricity generation. Luettu 29.3.2021. Taulukko 2.  
[https://wecanfigurethisout.org/ENERGY/Web\\_notes/Bigger\\_Picture/Where\\_do\\_we\\_go\\_Supporting\\_Files/Efficiency%20in%20Electricity%20Generation%20-%20EURELECTRIC.pdf](https://wecanfigurethisout.org/ENERGY/Web_notes/Bigger_Picture/Where_do_we_go_Supporting_Files/Efficiency%20in%20Electricity%20Generation%20-%20EURELECTRIC.pdf)

Hooker, J. N, 1981. Oil pipeline energy consumption and efficiency.  
<https://www.osti.gov/servlets/purl/6715373>

IELTS Tutors. Industrial Processes. Kuva 3. Luettu 23.3.2021.  
<https://www.ieltstutors.org/ielstutors-tips-blog/ielts-academic-writing-task-1-industrial-processes>

Kaksijakoinen atomiydin. 235U-isotoopin rikastaminen. Luettu 29.3.2021. Kuva 11.  
<http://book-test.gambitlabs.fi/fi/20-kevytvesireaktori/>

Kuljetusala, Ukk. Luettu 24.3.2021.  
<https://www.kuljetusala.com/fin/ukk/>

Kymäläinen, M. Pakarinen, O. 2015. Biokaasuteknologia. Suomen Biokaasuyhdistys ry. Kuva 7.  
[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/104180/HAMK\\_Biokaasun\\_tuotanto\\_2015\\_ekirja.pdf](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/104180/HAMK_Biokaasun_tuotanto_2015_ekirja.pdf)

Laivakuvat. M/t Stena Arctica. Luettu 23.3.2021.  
<https://laivakuvat.com/stena-arctica/>

Lehtinen, M. 2016. Nesteytettyä maakaasua polttoaineena käyttävien alusten turvallisuus. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu.  
[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/106158/Lehtinen\\_Markus.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/106158/Lehtinen_Markus.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Maa ja metsätalousministeriö. Bioenergia. Luettu 11.4.2021.  
<https://mmm.fi/biotalous/bioenergia>

Motiva, Biokaasu. 6.8.2020. Luettu 23.3.2021.  
[https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/bioenergia/biokaasu](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/bioenergia/biokaasu)

Motiva. Energian käyttö Suomessa. Luettu 29.3.2021. Kuva 2.  
[https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiankaytto\\_suomessa](https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiankaytto_suomessa)

Motiva. Energian loppukäyttö. Luettu 29.3.2021. Kuva 2.

[https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiankaytto\\_suomessa/energian\\_loppukaytto](https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiankaytto_suomessa/energian_loppukaytto)

Motiva, Vety. 6.8.2020. Luettu 23.3.2021. Taulukko 3.

[https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava\\_liikenne\\_ja\\_liikkuminen/nain\\_liikut\\_vii-saasti/valitse\\_auto\\_viisaasti/energialahteet/vety](https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_vii-saasti/valitse_auto_viisaasti/energialahteet/vety)

Pimentel David. 1980. Handbook of Energy Utilization In Agriculture. Kuvat 18,19 ja 20.

[https://books.google.fi/books?hl=fi&lr=&id=7zSoDwAAQ-BAJ&oi=fnd&pg=PA15&dq=fuel+production+energy+efficiency&ots=ZkqUKv-i8j&sig=kyAzmD8rl\\_8N1YDDwrtylWPkqk&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.fi/books?hl=fi&lr=&id=7zSoDwAAQ-BAJ&oi=fnd&pg=PA15&dq=fuel+production+energy+efficiency&ots=ZkqUKv-i8j&sig=kyAzmD8rl_8N1YDDwrtylWPkqk&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

Rosoff Matt. 26.10.2011. Elon Musk: Refining Gas Uses More Electricity Than Electric Cars. Businessinsider. Luettu 7.2.2021.

<https://www.businessinsider.com/elon-musk-and-chris-paine-explain-how-the-electric-car-got-its-revenge-2011-10?r=US&IR=T>.

Saprunov Sergei 2017. CALCULATION OF THE PRIMARY ENERGY FACTOR FOR FINNISH DISTRICT HEATING AND ELECTRICITY. XAMK.

[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/132307/Saprunov\\_Sergei\\_T6615KA%20calculation%20of%20the%20PEF%20for%20Finnish%20DH%20and%20electricity.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/132307/Saprunov_Sergei_T6615KA%20calculation%20of%20the%20PEF%20for%20Finnish%20DH%20and%20electricity.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Sheng Mingyue, Viswanath Sreenivasan Ajith, Sharp Basil, Du Bo. 2018. Well-to-wheel comparison of emissions and energy consumption for electric vehicles: Oceanian perspective. Kuva 22 ja 24.

Sun, J. 24.10.2010. Car Battery Efficiencies. Taulukko 3.

<http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/sun1/>

Suominen, J. 2011. NAANTALIN ÖLJYNJALOSTAMON HÖYRYJAKELUVERKON PI-KAAVION LUOMINEN. Prosessitekniikan koulutusohjelma. Saimaan ammattikorkeakoulu. Kuva 6.

[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/30557/Suominen\\_Jarno.pdf;jsessionid=FF23764BC6F4CF3FD07548695583E007?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/30557/Suominen_Jarno.pdf;jsessionid=FF23764BC6F4CF3FD07548695583E007?sequence=1)

Terrafame. Kysymyksiä ja vastauksia uraanin talteenotosta. Luettu 29.3.2021.

<https://www.terrafame.fi/kysymyksia-ja-vastauksia-uraanin-talteenotosta>

The engineering toolbox. Luettu 5.4.2021. Taulukko 1.

[https://www.engineeringtoolbox.com/co2-emission-fuels-d\\_1085.html](https://www.engineeringtoolbox.com/co2-emission-fuels-d_1085.html)

Tilanterä, A. 24.1.2016. Sähköenergian varastointi vetynä ja metaanina. Luettu 5.4.2021.

<https://maanystavat.fi/blogit/sahkoenergian-varastointi-vetyna-ja-metaanina>

Toppr. Petroleum refining and formation process. Luettu 5.4.2021. Kuva 5.

<https://www.toppr.com/guides/chemistry/coal-and-petroleum/petroleum-and-refining-of-petroleum/>

Toshiba. Wind power generation using wind energy. Luettu 29.3.2021. Kuva 12.  
<https://www.toshiba-energy.com/en/renewable-energy/product/wind-power.htm>

U.S. Department of transportation. NG Processing Plants. Luettu 23.3.2021.  
<https://primis.phmsa.dot.gov/comm/FactSheets/FSNaturalGasProcessing-Plants.htm>

US EPA. CHP Benefits. Luettu 11.4.2021  
<https://www.epa.gov/chp/chp-benefits>

EIA. Alaska North Slope Crude Oil Production. Luettu 11.4.2021.  
<https://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=PET&s=MANFPAK2&f=M>

Vartiainen, E. 4.9.2020. Vetytalous tulee – ennemmin tai myöhemmin.  
<https://www.fortum.fi/tietoa-meista/blogi/forthedoers-blogi/vetytalous-tulee-ennemmin-tai-myohemmin>

Van Leeuwen, J.W. Energy from uranium. 2006.  
[https://www.stormsmith.nl/Media/downloads/storm\\_van\\_leeuwen200607energy\\_from\\_uranium.pdf](https://www.stormsmith.nl/Media/downloads/storm_van_leeuwen200607energy_from_uranium.pdf)

Vattenfall. Sähkön tuottaminen vesivoimalla. Luettu 29.3.2021. Kuva 13.  
<https://www.vattenfall.fi/sahkosopimukset/tuotantomuodot/vesivoima/>

Ympäristölupapäätös, 2006. Neste Oil Oyj Porvoon jalostamo. Länsi-Suomen ympäristölupavirasto pdf. Kuvat 17, 19 ja 20.

Youssef, N. Amal, A. 2017. Hydrogen Generation by Water Electrolysis. Luettu 23.3.2021. Kuva 14.  
<https://www.intechopen.com/books/advances-in-hydrogen-generation-technologies/hydrogen-generation-by-water-electrolysis>