

# CO<sub>2</sub> -päästölaskenta sähkön ja lämmön yhteistuotantojärjestelmille (CHP) sekä suosituksia

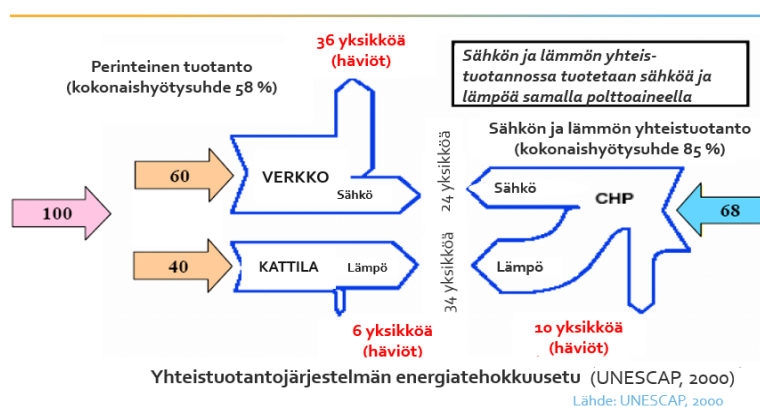
## 1 Motivaatio

Hiilidioksidipäästöjen jakomenetelmät ovat erittäin tärkeitä **energiapoliittisia työkaluja**, ja niitä kehitetään **tukemaan energiajärjestelmien suunnittelua, päätöksentekoa ja politiikan kehittämistä** niin valtiollisella, alueellisella kuin teollisellakin tasolla.

Hiilidioksidipäästöjen jakaminen yhteistuotannon energiantuotannolle on tarpeen erityisesti silloin, kun tuotettua lämpöä ja sähköä käyttävät eri asiakkaat ja kun on tehtävä vertailua muihin lämmöntuotannon tapoihin.

**Yhteistuotantojärjestelmät** tuottavat sähköä ja lämpöä, mutta lämpöä voidaan tuottaa fossiilisista polttoaineista tai sähköstä yli 95% hyötysuhteella, ja sähköenergiaa voidaan tuottaa fossiilisista

lämmöstä jopa 45% hyötysuhteella. Siitä nousee seuraava kysymys: Kuinka paljon tulisi jakaa tuotantoon? päästöjä meidän sähkön ja lämmön



## 2 Kasvihuonekaasupäästöjen arviointi

On 3 peruslaskukaavaa, joilla kuvataan erityyppisten polttoaineiden CO<sub>2</sub>-päästöjä:

$$\text{Kasvihuonekaasupäästöt} = \text{polttoaine} * EF_1 \quad (1)$$

*Kasvihuonekaasupäästöt* = CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> tai N<sub>2</sub>O -päästöjen määrä,

*polttoaine* = poltetun polttoaineen massa tai tilavuus,

*EF<sub>1</sub>* = CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> tai N<sub>2</sub>O -*päästökerroin* massan tai tilavuuden yksikölle

$$\text{Kasvihuonekaasupäästöt} = \text{Polttoaine} * HHV * EF_2 \quad (2)$$

*HHV* = polttoaineen lämpöpitoisuus (korkeampi lämmitysarvo, higher heating value),

energiayksikköinä polttoaineen massaa tai tilavuutta kohti;

*EF<sub>2</sub>* = CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, tai N<sub>2</sub>O -päästökerroin energian yksikölle

$$\text{Kasvihuonekaasupäästöt} = \text{Polttoaine} * \text{CC} * 44/12 \quad (3)$$

CC = polttoaineen hiilipitoisuus hiilimassayksikköinä polttoaineen massaa tai tilavuutta kohti,  
 44/12 = hiilidioksidin ja hiilen molekyylipainojen suhde.

## 2.1 Primäärienergia (PE)

tarkoittaa uusiutuvista ja uusiutumattomista lähteistä peräisin olevaa energiaa, jota ei ole jalostettu tai muunnettu. Primäärienergia voi olla fossiilista tai uusiutuvaa tai molempien yhdistelmä. Se voidaan muuntaa ja toimittaa loppukäyttäjälle loppuenergiana, esim. sähköinä tai lämpönä. Primäärienergian kulutus sisältää yleensä toimitusketjun alkupään toimintoja ja prosesseja (eli käytettävien polttoaineiden louhinnan, kuljetuksen ja valmistelun).

## 2.2 Primäärienergiakerroin (PEF)

Primäärienergiakerroin yhdistää primääri- ja loppuenergian – se kertoo, kuinka paljon primäärienergiaa käytetään sähkövirran yksikön tai hyödynnettävissä olevan lämpöenergian yksikön tuottamiseen

**Primäärienergia \* järjestelmän hyötysuhde = loppuenergia**

**Primäärienergiakerroin = primäärienergia/loppuenergialla**

# 3 CO<sub>2</sub> -päästöjen laskentamenetelmät

LowTemp –hankkeessa arvioitiin seuraavia (EU-alueen suosituimpia) menetelmiä: **Energiamenetelmä, Hyödynjakomenetelmä, Bonusmenetelmä, Eksergia-analyysi, 200%:n menetelmä, Pas 2050, Dresden-menetelmä.** Kirjallisuudessa esiintyy myös muita menetelmiä: niin kutsuttu työmenetelmä; suomalainen menetelmä; menetelmä, jossa kaikki säästöt jaetaan sähköntuotannolle; menetelmä, jossa kaikki säästöt jaetaan lämmöntuotannolle; menetelmä, jossa säästöt jaetaan 50%-50% lämmön ja sähkön kesken; sekä menetelmä, jossa huomioidaan lämmön ja sähkön primäärienergiapitoisuus.

## 3.1 Energiamenetelmä

**Energiamenetelmä** - polttoaineen kulutus tai hiilidioksidipäästöt jaetaan tuotetulle lämmölle ja sähkölle tuotteiden energiasisällön perusteella. Tämän menetelmän etuna on, että se on hyvin yksinkertainen ja läpinäkyvä. Haittapuolena on, että tuotteiden energiasisältö ei erottele energiatuotteita eli ei ota huomioon niiden ominaisuuksia (sähkö voidaan muuntaa lämmöksi helpommin kuin lämpö sähköksi). **CO<sub>2</sub> –päästöjen jakokerroin lämmöntuotannolle:**

$$f_Q = Q / (Q + E)$$

## 3.2 Hyödynjakomenetelmä

**Hyödynjakomenetelmän**, joka tunnetaan paikoin myös nimellä Vaihtoehtoisen tuotannon menetelmä (Alternative Generation Method) ja Hyötysuhde-menetelmä (Efficiency Method), on kehittänyt Palveleva kaukolämpö FinDHC -yhdistys. Menetelmä jakaa hiilidioksidipäästöt ja -resurssit lämmön ja sähkön tuotantoon suhteessa polttoaineeseen, joka tarvitaan, että saadaan tuotettua sama määrä lämpöä tai sähköä eri laitoksissa. Vaihtoehtoinen tuotanto kahdessa erillisessä laitoksessa riippuu niiden  $\eta_{\text{lämmön}}$  ja  $\eta_{\text{sähkön}}$  -tuotannon hyötysuhteista.

$$f_Q = (Q/\eta_{\text{vaihtoeht\_lämpö}}) / (Q/\eta_{\text{vaihtoeht\_lämpö}} + E/\eta_{\text{vaihtoeht\_sähkö}})$$

### 3.3 Bonusmenetelmä

**Bonusmenetelmää** (Power Bonus Method, sama kuin EN15316-4-5) käytetään usein hiilidioksidipäästöjen jakamiseen lämmön ja sähkön tuotannon välillä Euroopan unionin alueella.

Tässä menetelmässä lämpö on päätuote, ja prosessin aikana tuotettu sähkö nähdään bonuksena.

Primäärienergia jaetaan ensin CHP-laitoksella tuotetulle sähkölle, joka vähennetään myöhemmin primäärienergian kulutuksesta

$$f_Q = (E_{P,in} - W_{CHP} f_{P,elt}) / (Q_{del} + E_{del})$$

### 3.4 Eksergia-analyysi

**Eksergia-analyysi** (**physically correct** -menetelmä) - polttoaineen käyttö tai hiilidioksidipäästöt jaetaan tuotetulle lämmölle ja sähkölle tuotteiden eksergiatason perusteella. Tuotteen eksergiataso on mittari, joka kertoo energian maksimaalisen työhön kykenevän määrän. Energia- ja eksergiatason välistä suhdetta kutsutaan laatutekijäksi.

Termodynaamiselta kannalta yhteistuotannon aikana tuotettua sähköä arvioidaan eksergiakertoimella  $\alpha$ , joten sähkön eksergia määritellään  $Ex_E = E$ . Tämä tarkoittaa, että 100 % sähköstä voidaan muuntaa mihin tahansa energiamuotoon. Lämpö voidaan muuntaa sähköksi tai muuksi energiaksi vain jossain määrin, joten lämmön eksergia voidaan laskea

$$Ex_Q = (1 - T_o/T) Q$$

jossa  $T_o$  – on ympäristön keskimääräinen lämpötila lämmitysjakson aikana ja  $T$  on kaukolämmön termodynaaminen keskilämpötila:  $T = (T_s - T_r) / \ln(T_s/T_r)$

$$f_Q = Ex_Q / (Ex_Q + Ex_E)$$

### 3.5 200% menetelmä

200% menetelmä olettaa, että lämmöntuotannolla on 200% hyötysuhde. Se tarkoittaa, että yhden lämpöyksikön tuottamiseksi on käytettävä 0,5 yksikköä polttoainetta ja toinen 0,5 yksikkö otetaan talteen turbiinin lauhduttimesta. Näin puolet lämmöntuotantoon liittyvistä päästöistä voidaan yhdistää sähköntuotantoon. Tätä Tanskan energiaviraston käyttöön ottamaa menetelmää voidaan käyttää yhteistuotannon polttoainekustannusten jakamisessa lämmöntuotannolle energia- ja päästötilastoissa.

$$f_Q = Q / 2 \text{ Polttoaine}_{in}$$

### 3.6 Pas 2050

**PAS 2050 -menetelmä** on brittiläinen standardi, joka selittää, miten tavaroiden ja palvelujen tuotannosta syntyneet kasviuonekaasupäästöt lasketaan. Yhteistuotantojärjestelmän päästöjen jakamisessa tuotetulle lämmölle ja sähkölle käytetään erityistä "intensiteettikerrointa" 'n', joka määrittää polttoaineen palamisen aikana vapautuvat päästöt.

$$f_Q = Q / (Q + n E)$$

Päästöjen jakaminen lämmölle ja sähkölle perustuu lämmön ja sähkön prosessikohtaiseen suhteeseen kussakin CHP-järjestelmässä. Kattilapohjaisille CHP-järjestelmille (hiili, puu, kiinteä polttoaine) kerroin  $n$  on 2,5, ja turbiinipohjaisille CHP-järjestelmille (maakaasu, kaatopaikkakaasu)  $n = 2,0$ .

### 3.7 Dresden-menetelmä

Dresden-menetelmä perustuu eksergian arviointiin. Voimalaitoksissa kaikki primäärienergia liittyy sähkön tuotantoon. Samaan aikaan CHP-laitoksissa yksi osa primäärienergiasta käytetään lämpöenergian tuotantoon. Dresden-menetelmässä kuvataan, miten lämmön erottamisesta koituva sähkön menetys (vesihöyryn tiivistyminen) CHP-laitoksessa arvioidaan.  $\Delta E = Q \eta_c \eta_p$ , missä  $\eta_c$  on Carnot-hyötysuhde ja  $\eta_p$  on prosessin laadun aste.

Menetelmä	Lämmöntuotannon jakokerroin, $f_Q$	$f_Q$ -arvo esim.
Energiamenetelmä	$Q / (Q + E)$	0,2162
Hyödynjakomenetelmä	$f_Q = (Q / \eta_{\text{vaihtoeht. lämpö}}) / (Q / \eta_{\text{vaihtoeht. lämpö}} + E / \eta_{\text{vaihtoeht. sähkö}})$	0,3830
Bonusmenetelmä	$(E_{P, in} - W_{CHP} f_{P, el}) / (Q_{del} + E_{del})$	0,2226
Eksergia-analyysi	$Ex_Q / (Ex_Q + Ex_E)$	0,1507
200 % menetelmä	$Q / 2 \text{ Polttoaine}_{in}$	0,0608
PAS 2050	$Q / (Q + n E)$	0,1212
Dresden-menetelmä	$\Delta E / E$	0,0834

Yllä: Jakokerroin sähkön ja lämmön yhteistuotantojärjestelmälle, jonka vuosittainen lämpökuorma on 27 GWh ja suurin lämmöntarve 14 MW

Menetelmä	AGFW	ZBAU	BIU	RIU	IMP PAN	MEMORANDUM	HEM	SUM	Sija	Hajonta
Energiamenetelmä	52,000	52,000	49,857	52,286	53,143	<b>59,143</b>	53,143	<b>371,57</b>	<b>5</b>	<b>5,0 %</b>
Hyödynjakomenetelmä	43,286	53,286	46,429	52,714	45,857	36,429	40,571	<b>318,57</b>	<b>7</b>	<b>12,5 %</b>
Bonus-sähkömenetelmä	48,286	48,286	41,286	52,143	<b>55,429</b>	44,571	39,857	<b>329,86</b>	<b>6</b>	<b>11,1 %</b>
<b>Eksergiamenetelmä</b>	<b>71,000</b>	<b>71,000</b>	<b>70,714</b>	<b>60,714</b>	<b>60,571</b>	<b>59,429</b>	<b>57,000</b>	<b>450,43</b>	<b>1</b>	<b>9,0 %</b>
<b>200 % -menetelmä</b>	<b>60,286</b>	56,857	<b>59,143</b>	56,143	53,143	44,571	<b>66,000</b>	<b>396,14</b>	<b>3</b>	<b>10,9 %</b>
<b>PAS 2050</b>	57,571	<b>57,000</b>	<b>59,429</b>	<b>63,857</b>	<b>57,286</b>	44,571	<b>58,571</b>	<b>398,29</b>	<b>2</b>	<b>9,6 %</b>
Dresden-menetelmä	<b>63,857</b>	<b>63,857</b>	45,714	<b>60,143</b>	46,286	44,571	50,429	<b>374,86</b>	<b>4</b>	<b>15,1 %</b>
	<b>15,5 %</b>	<b>12,4 %</b>	<b>17,9 %</b>	<b>7,7 %</b>	<b>9,5 %</b>	<b>16,5 %</b>	<b>16,9 %</b>			

Lähde: T. Tereshenko T, Nord N, Uncertainty of the allocation factors of heat and electricity production of combined cycle power plant, Applied Thermal Engineering 2015; 76:410-4

## 4 Johtopäätökset

LowTemp -yhteistyökumppanit arvioivat jakomenetelmiä monikriteerisellä päätöksentekoaalyysillä (Multi-criteria decision analysis, MCDA)

- Yhteistyökumppanit ovat todenneet **Eksergia (Carnot) -menetelmän** parhaaksi käytettävissä olevaksi hiilidioksidipäästöjen jakomenetelmäksi (yli 450 pistettä) ainakin tarkasteltujen menetelmien joukossa. Kahta muuta menetelmää: **PAS 2050** ja **200%**: ta olisi pidettävä mahdollisina vaihtoehtoina – ne saivat yhtäläiset pisteet eli lähes 400 pistettä.
- Termodynamiikan kannalta sopivin menetelmä – **eksergiamenetelmä** – huomioi laajemmin energian laadun ja kuvaa fyysisen ylärajan hiilidioksidipäästöjen jakamiseen sivutuotteena syntyneelle lämmölle. Eksergiamenetelmästä on olemassa muunnelma, **Dresden-menetelmä**, mutta sitä varten tarvitaan enemmän dataa ja laajemmat laskelmat.
- Vähiten hyödyllisiksi vaihtoehtoiksi hankekumppanit ovat **todenneet hyödynjakomenetelmän** ja **Bonusmenetelmän**.