

Analüüs – Koostootmise kulude jagamise erinevad meetodikad

Töö nr A2

Detsember 2020
(Uuendatud Jaanuar 2021)

SISUKORD

SISSEJUHATUS JA EESMÄRK	3
KOKKUVÕTE	4
1. Piirtingimused	6
1.1. Piirtingimus 1: objekti piir.....	6
1.2. Piirtingimus 2: andmed.....	6
2. Teoreetilised alused	7
2.1. Turbiini kasutegur.....	7
2.2. Eksergia.....	7
2.2.1. Elektrienergia eksergia.....	7
2.2.2. Soojuse eksergia	8
3. ARVUTUSED	9
3.1. Koostootmisjaama mudel.....	9
3.2. Mehaaniline töö kondensatsioonirežiimis	10
3.3. Tehnilise töö võimekus (<i>inglise keeles availability</i>).....	10
3.4. Elektrienergia eksergia meetod.....	11
3.5. Eksergia kaugküttevõrgu soojuskandja meetodil	11
4. Kulude jagamise meetodid	13
4.1. Tulemused	13
4.2. Eksergia meetodite tundlikkus	14
4.2.1. Füüsilise ja alternatiivkatlamaja tundlikkus.....	15
4.3. Meetodikate võrdlus.....	15
4.3.1. Lihtsus.....	15
4.3.2. Seos termodünaamilise protsessiga.....	16
4.3.3. Koostootmise arengud.....	16
KASUTATUD ALLIKAD	17

TABELITE LOETELU

Tabel 3.1. Koostootmisjaama parameetrid	9
Tabel 3.2. Kondensatsioonirežiimi parameetrid.....	10
Tabel 3.3. Tehnilise töö arvutustabel.....	11
Tabel 3.4. Vasturõhuturbiini eksergia	11
Tabel 3.5. Kaugküttevõrgu eksergia.....	12
Tabel 4.1. Koostootmisjaama mudeli väärtused	13
Tabel 4.2. Kulude jagamise meetodikate tulemused nominaalvõimsusel.....	13

JOONISTE LOETELU

Joonis 1.1. Vasturõhu KTJ.....	6
Joonis 1.2. Kondensatsioonirežiim.....	6
Joonis 2.1. Ideaalne Rankine'i ringprotsess.....	7
Joonis 2.2. Tegelik Rankine'i ringprotsess	7
Joonis 3.1. Koostootmisjaama mudel	9
Joonis 3.2. Kondensaatori temperatuuri mõju, MW	10
Joonis 3.3. Kondensaatori temperatuuri mõju, %.....	10
Joonis 3.4. Kaugküttevõrgu eeldused.....	12
Joonis 3.5. Temperatuuride mõju.....	12
Joonis 4.1. Kulude jagamise meetodikate tulemused nominaalvõimsusel	14
Joonis 4.2. Eksergia meetod	14
Joonis 4.3. Soojuse eksergia meetod.....	14
Joonis 4.4. Soojuse nominaalvõimsuse töötundide mõju sisendenergia soojuse osakaalule.....	15

SISSEJUHATUS JA EESMÄRK

Analüüs on jagatud nelja peatükki. Esimeses peatükis on kirjeldatud analüüsi piirtingimused. Teises peatükis lühiülevaade teoreetilistest alustest, mis on vajalikud eksergia meetodi rakendamiseks. Kolmandas peatükis on koostatud koostootmisjaama mudeli termodünaamilised arvutused. **Arvutused põhinevad teoreetiliste andmete põhjal koostatud koostootmisjaama mudelil, millest lähtumisel soojuse piirhinna kooskõlastamisel töö koostaja ei vastuta.** Neljandas peatükis on analüüsitud töö eesmärgis püstitatud küsimusi ning võrreldud erinevaid koostootmise kulude jagamise meetodikaid.

Analüüsi tulemused on sõltumatud ja erapooletud. Töö on koostanud protsessiinsener Enar Kraav, diplomeeritud soojusenergeetikainsener, tase 7, kt. 153211.

Analüüsi eesmärk on anda vastused Konkurentsiametiga kooskõlastatud lähteülesande alusel:

- 1. Analüüsida Konkurentsiameti poolt soojuse hindade kooskõlastamisel kasutatavaid koostootmisjaama kulude jagamise meetodeid (alternatiivkatlamaja ja füüsikaline meetod soojuse tootmise kasuteguri alusel), tuues välja nende meetodikate eelised ja puudused.*
- 2. Analüüsida, kui suur osa kuludest näidisvasturõhurbiini korral läheb elektri tootmiseks ja kui suur soojuse tootmiseks eksergia jagunemise järgi.*
- 3. Võrrelda, kui palju annab füüsikaline meetod teistsuguse tulemuse, kui termodünaamiline eksergia meetod.*
- 4. Kas eelpoolnimetatud kahe meetodika osas tuleks lõpetada alternatiivkatlamaja meetodika selge eelistamine (füüsikalist rakendatakse juhul, kui ei ole võimalik sama kütust/kütuste kombinatsiooni põletada alternatiivse katlamaja tehnoloogiaga)?*

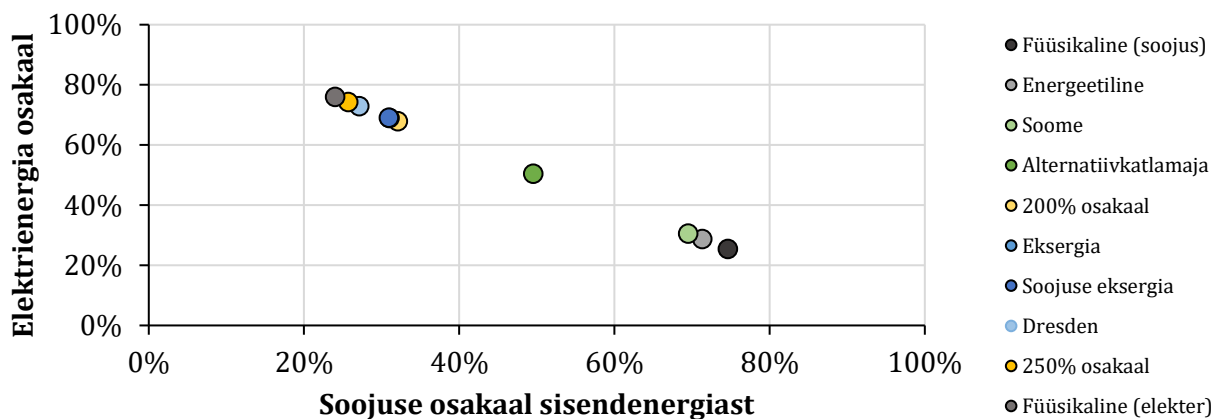
Erinevate meetodikate analüüsimisel võtta muuhulgas arvesse alljärgnevat aspekte:

- a) soojuse tootmise monopoolsus ja elektri tootmise vabaturg;*
- b) koostootmise potentsiaalset saadava kasu rakendumine soojustarbijale;*
- c) meetodikate seos füüsikaliste protsessidega;*
- d) meetodikate rakendamise lihtsus ja võimalused nende igapäevaseks kasutamiseks.*

KOKKUVÕTE

Koostatud analüüsi tulemusena on vastused töö eesmärgis püsitatud küsimustele järgmised:

Uurimisküsimus 1: Kulude jagamise meetodid ja nende võrreldavad andmed on esitatud Joonisel 1, Tabelis 4.2 ning peatükis 4.3. Analüüsitud meetodidest sobib kõige enam soojuse eksergia meetod, kui lähtuda soojuse kulude jagamisel arvutamise lihtsusest, vähesest seosest poliitiliselt fikseeritud väärtustega ning soojustarbijatele koostootmise efekti tagamisest.

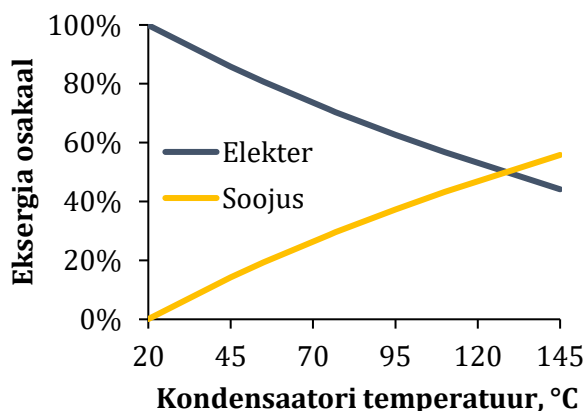


Joonis 1. Kulude jagamise meetodikate tulemused nominaalvõimsusel

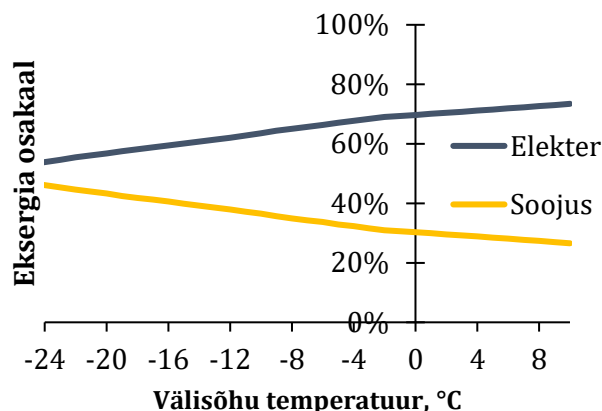
Uurimisküsimus 2 ja 3: Koostatud koostootmisjaama mudeli põhjal on nominaalvõimsusel soojuse osakaal sisendenergiast eksergia meetodil 31% ning elektrienergia osakaal 69%.

Arvestades välisõhu temperatuuride kestvustunde on soojuse eksergia meetodi soojuse osakaalu kaalutud keskmine 31% sisendenergiast. Kahe eksergiameetodi võrdlemiseks võrreldakse tulemusi koostatud mudeli kaugküttevõrgu suurimal temperatuuril 110 °C ning kaalutud keskmisel temperatuuril 76,8 °C. Eksergia meetodil on soojuse osakaal sisendenergiast valitud temperatuuridel vastavalt 43% ja 30%. Soojuse eksergia meetodil on samad väärtused 47% ja 31%. Madalamal temperatuuril annavad meetodid sarnasema tulemuse. Kõrgemal temperatuuril on tulemuste vahe 4% (Joonis 1 ja 2). Soojuse nominaalvõimsuse 5800 töötunni juures on soojuse osakaal sisendenergiast eksergia meetodil 24%, 3800 töötunni juures 17% (Joonis 3).

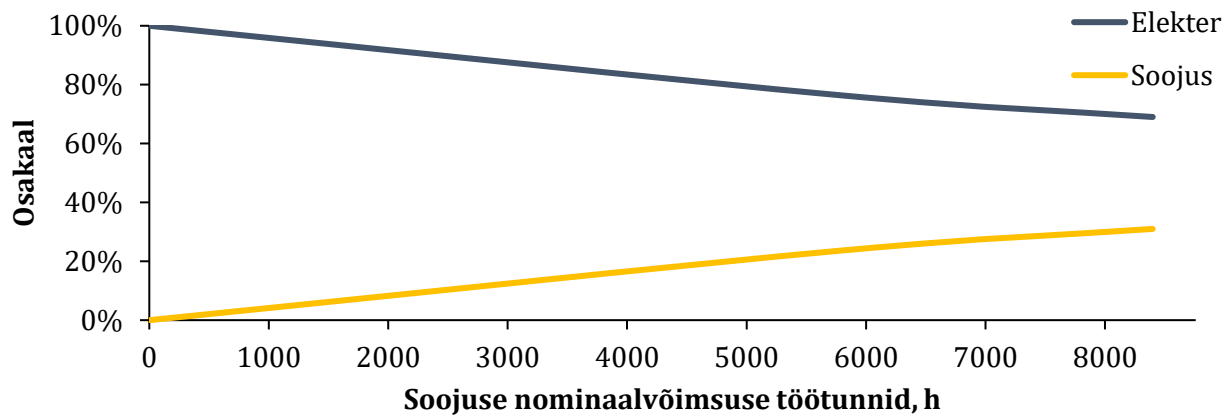
Samal põhimõttel füüsikalise ja alternatiivkatlamaja meetodite valemite rakendamisel on füüsikalise meetodi soojuse osakaal sisendenergiast 66% ning alternatiivkatlamaja korral 40%. 3800 töötunni korral on samad väärtused 55% ja 31%.



Joonis 1. Eksergia meetod



Joonis 2. Soojuse eksergia meetod



Joonis 3. Soojuse nominaalvõimsuse töötundide mõju sisendenergia soojuse osakaalule

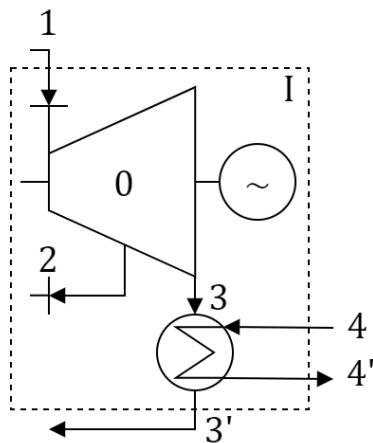
Uurimisküsimus 4: Alternatiivkatlamaja sisendenergia soojuse osakaalu väärtus on arvutuslikult sarnasem eksergia tulemusele kui füüsilise meetodi puhul. Seega soojustarbijale on soodsam rakendada alternatiivkatlamaja meetodikat, sest füüsikaline meetod ei arvesta, et elektrienergiat toodetakse kütuse primaarenergiast saadud soojuse arvelt ning soojustarbija seisukohalt oleks võinud soojust toota ka katlamajas. Füüsilise meetodi järgi tuleb seetõttu soojuse osakaal sisendenergiast väga kõrge, mis põhjustab kallima soojuse hinna tarbija jaoks. See viib olukorrani, kus koostootmine ei ole tarbija huvides kõige mõistlikum investering, sest sama soojuse oleks võinud tarbija seisukohalt toota ka katlamajas.

1. Piirtingimused

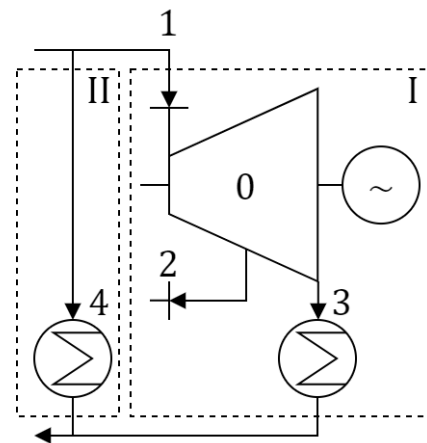
1.1. Piirtingimus 1: objekti piir

Joonisel 1.1 on esitatud koostootmisjaama vasturõhul töötava turbiini lihtsustatud skeem. Vasturõhuturbiini lõpprõhk määratakse kaugküttevõrgu temperatuuri järgi. Auru kondenseerumise temperatuur on võrdne kaugküttevõrgus soovitud temperatuuriga. Joonisel 1.1 esitatud objekti piir „I“ hõlmab turbiini soojuse ja elektrienergia koostootmist – elektrienergia tootmiseks toodetud auru soojust kasutatakse kaugküttevõrgu vee soojendamiseks (koostootmiserežiim). Üldiselt on võimalik koostootmisjaama käitada ka kondensatsioonirežiimis, kui on paigaldatud piisavalt jahutusvõimsust või katlamajarežiimis, kus auru turbiini üldse ei juhitata. Joonisel 1.2 on esitatud skeem koostootmisjaamale, mida on võimalik käitada ka kondensatsioon- või katlamajarežiimis ehk soojust ja elektrienergiat on võimalik toota teineteisest eraldatult. Vasturõhul töötava koostootmisjaama kondensatsioonirežiimis töötamisel on võimalik selgelt eristada elektrienergia tootmine (Joonisel 1.2 objektipiir I) soojuse tootmisest (Joonisel 1.2 objektipiir II). Ühtlasi on võimalikud ka olukorrad, kus piisava jahutusvõimsuse korral toodetakse ainult elektrienergiat (kondensatsioonirežiim) või turbiini seiskamisel toodetakse ainult soojust (katlamajarežiim). Sellest tingituna on koostootmisjaama soojuse ja elektrienergia tootmise kulude jagamisel oluline määratleda piirtingimus, mis on kasulik soojustarbijale. Soojustarbija ei saa kondensatsioon- või katlamajarežiimis töötava koostootmisjaama koostootmise efekti, kuna soojust oleks võinud alternatiivselt toota ka katlamajas, mille püsikulu oleks ainult soojuse tootmisel madalam. Lisaks ei ole kaugküttevõrgu soojuse tarbijatel alternatiivi, sest soojuse tootja on enamik juhtudel monopoolses seisundis ja soojustarbija on piiratud kaugküttepiirkonna kaugkütteseadusega.

Analüüsis lähtutakse edaspidi koostootmiserežiimist (Joonis 1.1), sest kondensatsioon- ja katlamajarežiimis (Joonisel 1.2) töötaval koostootmisjaamal on selgelt eristuv soojuse ja elektrienergia tootmise kulu. Analüüsis lähtutakse põhimõttest, et koostootmisjaamas elektrienergia tootmiseks toodetud auru soojust kasutatakse kaugküttevõrgu vee soojendamiseks. Analüüs ei sisalda olukorda, kus koostootmisjaamal on võimekus käitada auruturbiini täisvõimsusel ning üheaegselt ka suunata veel täiendavat auru enne turbiini soojustarbijatele. Sellisel juhul on tegemist koostootmiserežiimis osalise katlamajarežiimiga ning turbiinist kõrvale juhitud ja soojustarbijale suunatud soojuse kogust saab soojusmõõturiga mõõta.



Joonis 1.1. Vasturõhu KTJ



Joonis 1.2. Kondensatsioonirežiim

Joonisel: 0 – turbiin, 1 – turbiini sisenev aur, 2 – turbiini vaheltvõttust deaeraatorisse väljuv aur, 3 – turbiini kondensaator ja soojustarbija soojusvaheti, 4 – kaugküttevõrk.

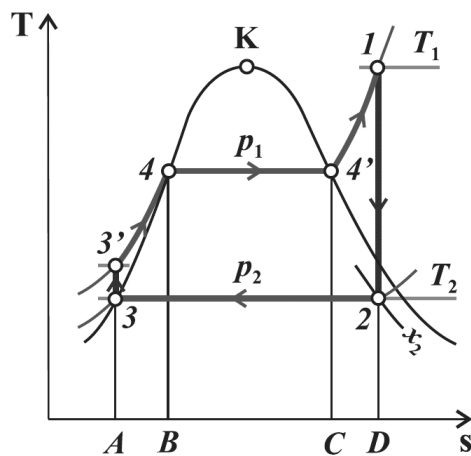
1.2. Piirtingimus 2: andmed

Mõõdetud andmete puudumise tõttu analüüsitakse koostootmisjaama soojuse ja elektrienergia kulude jagamist teoreetiliselt.

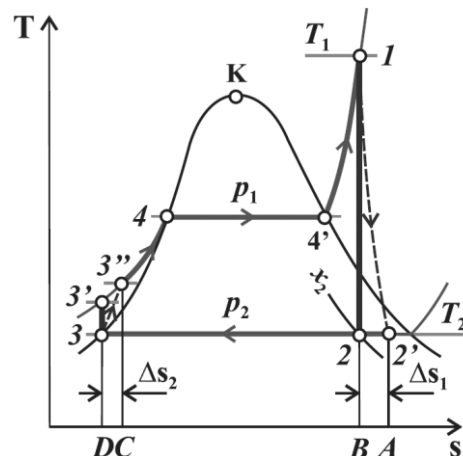
2. Teoreetilised alused

2.1. Turbiini kasutegur

Joonisel 2.1 on esitatud ideaalne ülekuumendatud auruga Rankine'i ringprotsess. Auruturbiini siseneva auru algpunkt on 1 ning turbiinis auru poolt tehtav töö kondensaatorini (punkt 2), on esitatud isoentropse joonega 1-2. Isoentropse protsessi korral auru entroopia ei kasva ning sellisel juhul saavutatakse suurim võimalik tehtav töö. Termodünaamika esimese seaduse järgi muutub osa mehaanilisest energiast siseenergiaks ehk soojuseks ja teise seaduse alusel kulgevad kõik protsessid entroopia kasvu suunal, seega täielikult kadude vaba kasulikku tööd ei ole võimalik auruturbiinis saavutada. Auruturbiinis esinevad hõõrdejõud põhjustavad auru entroopia pöördumatu kasvu ja elektrienergia tootmise vähenemise, mis on ringprotsessis vältimatu (süsteemi soojuskadu). Seega kogu auru energiat ehk soojust ei ole võimalik täielikult muuta elektrienergiaks. Entroopia kasv on joonisel 2.2 esitatud punktide 2 ja 2' vahega Δs_1 .



Joonis 2.1. Ideaalne Rankine'i ringprotsess



Joonis 2.2. Tegelik Rankine'i ringprotsess

Analüüsis kasutatava mudeli loomiseks on oluline arvestada turbiini kasutegurit, sest selle põhjal saab arvutada tegeliku entalpia turbiini lõpus.

Auru kasulik töö, kJ/kg:

$$l_t = (h_1 - h_2) \quad [1]$$

Auru tegelik kasulik töö, kJ/kg:

$$l'_t = (h_1 - h_{2'}) \quad [2]$$

Turbiini suhteline sisemine kasutegur:

$$\eta = \frac{l'_t}{l_t} = \frac{(h_1 - h_{2'})}{(h_1 - h_2)} \quad [3]$$

Auru entalpia turbiini lõpus, kJ/kg:

$$h_{2'} = h_1 - \eta(h_1 - h_2) \quad [4]$$

h – auru entalpia, kJ/kg.

Mudelarvutuses kasutame turbiini, mille sisemine kasutegur on 0,88.

2.2. Eksergia

2.2.1. Elektrienergia eksergia

Lisaks eelnevalt mainitud termodünaamika seadustest tulenevatele elektrienergia tootmisel esinevatele kadudele, tuleb arvestada ka auru algoleku ja keskkonna temperatuuri ja rõhu lõpp-

Analüüs – koostootmise kulude jagamise erinevad meetodikad

Töö number A2

Energex Energy Experts OÜ

parameetreid. Auruturbiiniga suurim elektrienergia tootlikkus saavutatakse juhul, kui auru rõhu ja temperatuuri parameetrid on turbiini lõppfaasis võrdsed keskkonna parameetritega. Auru soojuse maksimaalset elektrienergiaks muundatavust väljendab eksergia:

$$e = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad [5]$$

e – auru eksergia, kJ/kg,
 h – auru algoleku entalpia, kJ/kg,
 h_0 – keskkonna entalpia, kJ/kg,
 T_0 – keskkonna temperatuur, K,
 s – auru algoleku entroopia, kJ/(kgK),
 s_0 – keskkonna entroopia, kJ/(kgK).

Valemist järeldub, et auru eksergia ehk kasuliku töö potentsiaal läheneb nullile, mida sarnasemad on auru parameetrid keskkonna parameetritele. Samuti, mida kõrgem on soojustarbija soovitud temperatuur, seda rohkem väheneb elektrienergia tootmise potentsiaal. Vastupidiselt soojusele saab toodetud elektrienergiat muundada täielikul mahul nii soojuseks kui ka mehaaniliseks energiaks. Sellele põhimõttele tuginedes on arvestatud, et elektrienergia eksergia väärtus on võrdne elektrienergia kogusega.

Keskkonna termodünaamiliste omaduste määramisel kasutame mudelarvutuses NIST (National Institute of Standards and Technology) normaaltingimuse väärtuseid:

- T – temperatuur 293,15 K (20°C).
- P – rõhk 101 325 Pa.

2.2.2. Soojuse eksergia

Kuumema keha soojuse siirdumine jahedamale kehale vähendab selle keha töövõimet. Soojuse töövõime on seda suurem, mida madalam on väliskeskkonna temperatuur ja suurem soojuskandja temperatuur. Soojuse eksergia arvutatakse kaugküttevõrgu soojuskandja temperatuuride alusel, mis on võrdne Carnot' termilise kasuteguriga ja ringrotsessi tööga:

$$e_s = \left(\frac{T_{log} - T_0}{T_{log}} \right) Q_s = \left(1 - \frac{T_0}{T_{log}} \right) \cdot Q_s \quad [6]$$

e_s – soojuse eksergia, kW
 T_0 – väliskeskkonna kütteperioodi keskmine temperatuur, K
 T_{log} – kaugküttevõrgu soojuskandja logaritmiline temperatuuride vahe, K
 Q_s – koostootmisjaama kaugküttevõrku antav võimsus, kW

Logaritmiline temperatuuride vahe kaugküttevõrgus:

$$T_{log} = \frac{(T_s - T_r)}{(\ln \frac{T_s}{T_r})} \quad [7]$$

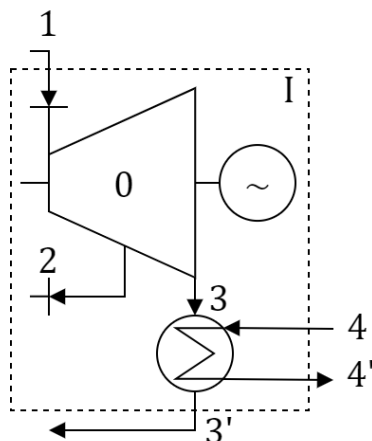
T_s – kaugküttevõrgu pealevoolu temperatuur, K
 T_r – kaugküttevõrgu tagasivoolu temperatuur, K

3. ARVUTUSED

3.1. Koostootmisjaama mudel

Joonisel 3.1 on esitatud lihtsustatud koostootmisjaama mudel. Tabelis 3.1 on esitatud mudeli auru termodünaamilised omadused, mis on arvatud IAPWS-97 (*International Organization of Water and Steam Properties*) standardi alusel. Koostootmisjaama mudeli peamised eeldused on järgmised:

- Deaeraatori tarve on 9% turbiini sisenevast aurust.
- Koostootmisjaama elektrienergia omatarbimine on 10%.
- Turbiini sisemine kasutegur on 88%.
- Kaugküttevõrgu soovitud temperatuur on 75°C ja vasturõhu temperatuur on 80°C.



Joonis 3.1. Koostootmisjaama mudel

Tabel 3.1. Koostootmisjaama parameetrid

Positsioon	tähis	1	2	3	3'	4	4'
Massivoog*		1	-1	-1	-1	1	-1
Absoluutne rõhk, kPa	p	6000	415,6	47,4	47,4	600	550
Temperatuur, °C	t	500	145	80	80	46	76,8
Temperatuur, K	T	773,2	418,2	353,2	353,2	319,2	350,0
Mass, kg/s	m	26,0	2,3	23,7	23,7	399,4	-399,4
Entroopia, kJ/(kgK)	s	6,88	7,07	7,23	1,08	0,65	1,04
Entalpia, kJ/kg	h	3422,9	2820,8	2509,4	334,9	193,1	321,9
Võimsus, kW	N	88 995	-6601	-59 373	-7925	51 448	-51 448

* Määramaks auru (massi) sisenemise ja väljumise suunda süsteemis, massijäävuse seaduse kohaselt auru sisend positiivsena ja väljund negatiivselt

Massi- ja energiajäävuse seadusest turbiini elektrienergia võimsus, kW:

$$N_e = +m_1 h_1 - m_2 h_2 - m_3 h_3 = +N_1 - N_2 - N_3 \quad [8]$$

Kaugküttevõrgu antav soojus, kW:

$$N_s = +m_3 h_3 - m_{3'} h_{3'} = N_3 - N_{3'} \quad [9]$$

Koostatud koostootmisjaama mudeli turbiini bruto elektrienergia tootlikkus on 23 022 kW. Koostootmisjaama elektrienergia omatarve on 2302 kW. Seega elektrienergia neto tootlikkus on 20 720 kW.

Kaugküttevõrgu suunatav soojusvõimsus on 51 448 kW. Koostootmisjaama elektrienergia ja soojuse suhe on 0,45.

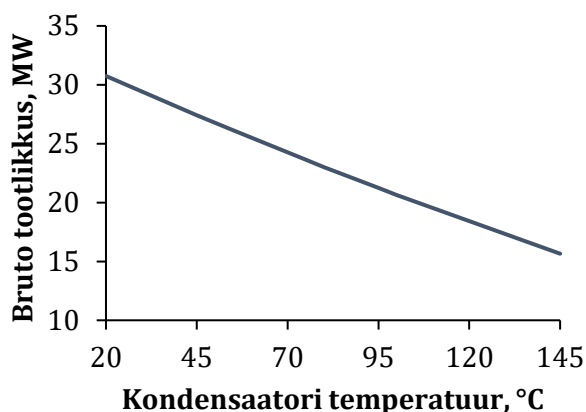
3.2. Mehaaniline töö kondensatsioonirežiimis

Tabelis 3.2 on esitatud koostatud koostootmisjaama mudel kondensatsioonirežiim. Kondensaatori temperatuuriks on valitud normaaltingimuse 20°C. Massi- ja energijäävuse seaduse järgi on turbiini elektrienergia võimsus 30 746 kW. Võrreldes koostootmisrežiimiga on elektrienergia tootlikkus kasvanud 7724 kW, eeldades sama 2302 kW koostootmisjaama omatarvet. Joonis 3.2 ja 3.3 esitavad kondensaatori temperatuuri mõju turbiini elektrienergia tootlikkusele.

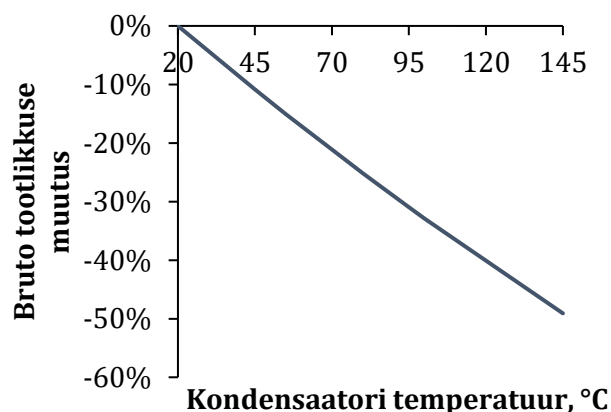
Tabel 3.2. Kondensatsioonirežiimi parameetrid

Positsioon	Tähis	1	2	Ko*
Massivoog		1	-1	-1
Absoluutne rõhk, kPa	P	6000	415,6	2,3
Temperatuur, °C	T	500	145	20
Temperatuur, K	T	773,2	418,2	293,2
Mass, kg/s	M	26,0	2,3	23,7
Entroopia, kJ/(kgK)	S	6,88	7,07	7,46
Entalpia, kJ/kg	H	3422,9	2820,8	2183,0
Võimsus, kW	N	88 995	-6601	-51 649

* Ko - Kondensatsioonirežiimi kondensaator/jahutid



Joonis 3.2. Kondensaatori temperatuuri mõju, MW



Joonis 3.3. Kondensaatori temperatuuri mõju, %

3.3. Tehnilise töö võimekus (inglise keeles availability)

Tabelis 3.3 on esitatud tehnilise töö arvutused. Inglise keeles kasutatakse selleks terminit *availability*, mis näitab süsteemi maksimaalset saavutatavat kasulikku tööd (elektrienergiat). Tehnilise töö arvutusvalem sarnaneb eksergia valemiga, kuid erinevus on lõpp-parameetrites. Kui eksergia arvutamisel arvutatakse suurim võimalik elektrienergia tootlikkus väliskeskkonna normaaltingimuste lõpp-parameetritega, olenemata süsteemi võimekusest, siis tehnilise töö arvutusel keskendutakse reaalsele süsteemi võimekusele.

$$l_t = (h - h_{K0}) - T_{K0}(s - s_{K0}) \quad [10]$$

l_t - tehniline töö, kJ/kg,
 h - auru algoleku entalpia, kJ/kg,
 h_{K0} - kondensaatori entalpia, kJ/kg,
 T_{K0} - kondensaatori temperatuur, K,
 s - auru algoleku entroopia, kJ/(kgK),
 s_{K0} - kondensaatori entroopia, kJ/(kgK).

Energex Energy Experts OÜ

Tulemustest on näha, et kui lõpp-parameetrid on kondensatsioonirežiimi parameetrid (Tabel 3.2), siis koostootmisrežiimil (pos 3) on aurul potentsiaal toota 7724 kW elektrienergiat, mis on võrdne eelnevas peatükis arvatatud elektrienergia tootlikkuse kasvuga.

Samuti, kui lahutada turbiini sisenevalt aurult (pos 1) deaeraatori (pos 2) elektrienergia potentsiaal, on tulemuseks 30 746 kW, mis vastab kondensatsioonirežiimi tootlikkusele. Lisaks, kondensaatori (pos 3) auru potentsiaali lahutamisel on tulemus 23 022 kW, mis vastab koostootmisrežiimi tootlikkusele.

Tabel 3.3. Tehnilise töö arvutustabel

Positsioon	Tähis	1	2	3
Massivoog		1	-1	-1
Tehniline töö, kJ/kg	l_t	1409	752	392
sh tagastamatus, kJ/kg	-TdS	-169,1	-113,8	-65,7
Tehniline töö, kW	l_t	36635	1759	9278
sh tagastamatus, kW	-TdS	-4396	-266	-1554
Elektrienergia potentsiaal, kW	l_t	32 239	1493	7724

3.4. Elektrienergia eksergia meetod

Tabel 3.4 esitab koostootmisrežiimi kondensaatori (kaugküttevõrgu soojusvaheti) eksergia arvutatuna väliskeskonna normaaltingimustel.

Soojuse eksergia vasturõhu kondensaatoris on 393 kJ/kg ja 9302 kW (Tabel 3.4), mis on küllaltki sarnane kondensatsioonirežiimi tehnilise töö tulemustega – 392 kJ/kg ja 9278 kW (Tabel 3.3), kuna lõpp-parameetrid on ligilähedased. Eksergia on süsteemi elektrienergia tootmise maksimum, mille väärtust ei ole võimalik ületada, sest energiakandja saavutab tasakaalu keskkonnaga. Erinevus tuleneb kodensaatoris tekitatud vaakumi ja normaaltingimuste auru kuivuse, entalpia ja entroopia parameetrite vahel. Turbiini sisenenud kuiv ülekuumendatud aur on turbiini lõpus auru ja veeauru segu (mudeli kuivus on 85,6%) enne kui kondensaatoris auru ja veeauru segu täielikult kondenseeritakse veeks. Turbiini seisukohalt ei ole majanduslikult mõistlik saavutada suurim elektrienergia tootlikkus auru kuivuse arvelt, sest mida suurem on veeauru osakaal aurus, seda suurem on turbiinilabade korrosiooni oht.

Arvutuste seisukohalt normaaltingimuse parameetrite kasutamisega kaasneb arvutuse lihtsus ja võimalus võrrelda erinevatel algparameetritel töötavaid turbiine olenemata režiimist.

Tabel 3.4. Vasturõhuturbiini eksergia

Positsioon	tähis	1	2	3	NT*
Absoluutne rõhk, kPa	p	6000	415,6	47,4	101
Temperatuur, °C	t	500	145	80	20
Temperatuur, K	T	773,2	418,2	353,2	293,2
Mass, kg/s	m	26,0	2,3	23,7	
Entroopia, kJ/(kgK)	s	6,88	7,07	7,23	0,30
Entalpia, kJ/kg	h	3422,9	2820,8	2509,4	83,9
Eksergia, kJ/kg	e	1410	753	393	
Eksergia, kW	e	36661	1761	9302	

* NT – normaaltingimus

3.5. Eksergia kaugküttevõrgu soojuskandja meetodil

Tabel 3.5 esitab eksergia kaugküttevõrgu soojuskandja meetodil. Kaugküttevõrgu aasta keskmised temperatuurid on arvatatud Eesti normaalaasta kütteperioodi välisõhutemperatuuride väärtuste alusel. Mudelis arvatatud keskmiste temperatuuride alusel arvatatud tulemus on ligikaudu sama, mis keerukate tehnilise töö ja elektrienergia eksergia arvutusvalemitega. Tulemus erineb eksergia valemist 0,24% ning 0,02% tehnilise töö valemist.

Energex Energy Experts OÜ

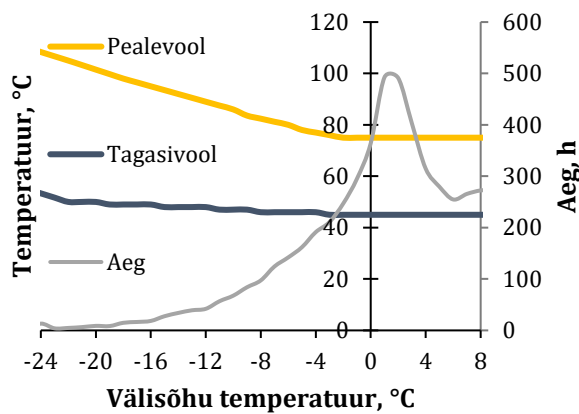
Tuleb arvestada, et koostatud kaugküttevõrgu mudeli keskmisi väärtusi kasutades (Joonis 3.4) on tulemuse sarnasus pigem kokkusattumus koostatud mudelis, sest soojuse eksergia väärtus sõltub suuresti valitud temperatuuridest (Joonis 3.5). Tabel 3.5 esitatud väärtuste valemi näide:

$$T_{log} = \frac{(T_s - T_r)}{\left(\ln \frac{T_s}{T_r}\right)} = \frac{((76,8 + 273,15) - (46 + 273,15))}{\left(\ln \frac{(76,8 + 273,15)}{(46 + 273,15)}\right)} \quad [11]$$

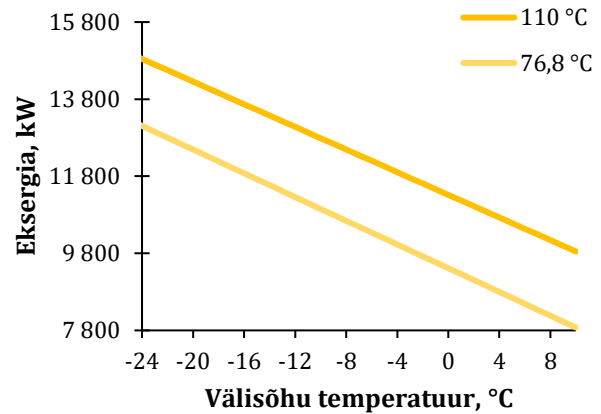
$$e_s = \left(1 - \frac{T_0}{T_{log}}\right) \cdot Q_s = \left(1 - \frac{(0,9 + 273,15)}{334,3}\right) \cdot 51\,448 \quad [12]$$

Tabel 3.5. Kaugküttevõrgu eksergia

Näitaja	tähis	Väärtus
Keskkonna aasta keskmine õhutemperatuur, K	T_0	274 (0,9 °C)
Kaugküttevõrgu pealevoolu aasta keskmine temperatuur, °C	t_s	350 (76,8°C)
Kaugküttevõrgu tagasivoolu aasta keskmine temperatuur, °C	t_r	319 (46 °C)
Kaugküttevõrgu logaritmiline temperatuur, K	T_{log}	334,3
Kaugküttevõrgu võimsus, kW	Q	51 448
Soojuse eksergia, kW	e_s	9280



Joonis 3.4. Kaugküttevõrgu eeldused



Joonis 3.5. Temperatuuride mõju

4. Kulude jagamise meetodikad

4.1. Tulemused

Tabel 4.1 esitab koostootmisjaama mudeli väärtused, mis on vajalikud erinevates kulude jagamise valemities. Alternatiivkatlamaja kasuteguri väärtused vastavad hakkpuidu kütust põletavatele tehnoloogiatele. Erinevad kulude jagamise meetodikad on võetud kasutatud allikatest ning koondatud tabelisse 4.2. Kulude jagamise soojuse ja elektrienergia osakaalud on arvatud nominaalvõimsusel töötavale koostootmisjaamale.

Tabel 4.1. Koostootmisjaama mudeli väärtused

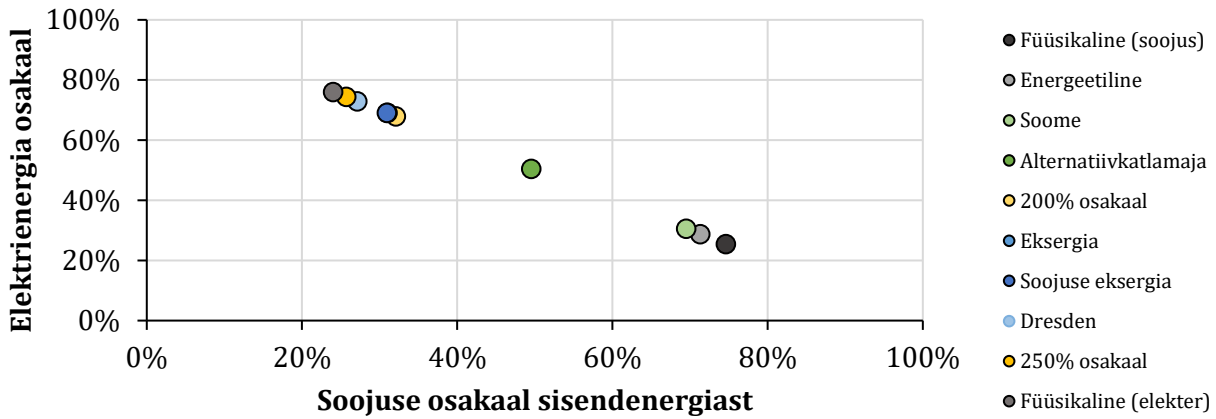
Näitaja	Tähis	Väärtus
Soojuse võimsus, kW	Q	51 448
Elektrienergia netovõimsus, kW	E	20 720*
Primaarenergia, kW	F	80 186
Kondensatsiooni elektrienergia netovõimsus, kW	E _{Ko}	28 444
Koostootmisjaama kasutegur	η _{CHP}	90%
Alternatiivse katlamaja soojuse tootmise kasutegur	η _q	86%
Alternatiivse elektrienergia tootmise kasutegur	η _e	34%
Eksergia [5]	e	9302
Soojuse eksergia [6]	e _s	9280

* Omatarve 2302 kW, brutovõimsus 23 022 kW.

Tabel 4.2. Kulude jagamise meetodikate tulemused nominaalvõimsusel

nr	Meetod	Valem	Soojuse osakaal	Elektri osakaal
1	Füüsikaline (soojus)	$p_s = \frac{Q}{\eta_q \cdot F}$	0,75	0,25
2	Energeetiline	$p_s = \frac{Q}{(Q + E)}$	0,71	0,29
3	Soome	$p_s = 1 - \left[1 - \left(\frac{1}{\left(\frac{Q}{\eta_q \cdot F_q} \right) + \left(\frac{E}{\eta_e \cdot F_e} \right)} \right) \right] \cdot \frac{\eta_{CHP}}{\eta_q}$	0,69	0,31
4	Alternatiivkatlamaja	$p_s = \frac{F_q}{(F_q + F_e)} = \frac{\frac{Q}{\eta_q}}{\left(\frac{Q}{\eta_q} + \frac{E}{\eta_e} \right)}$	0,50	0,50
5	200% osakaal	$p_s = \frac{Q}{2 \cdot F}$	0,32	0,68
6	Eksergia	$p_s = \frac{e}{(e + E)}$	0,31	0,69
7	Soojuse eksergia	$p_s = \frac{e_s}{(e_s + E)}$	0,31	0,69
8	Dresdeni	$p_s = \frac{(E_{Ko} - E)}{E_{Ko}}$	0,27	0,73
9	250% osakaal	$p_s = \frac{Q}{2,5 \cdot F}$	0,26	0,74
10	Füüsikaline (elekter)	$p_s = 1 - \frac{E}{\eta_e \cdot F}$	0,24	0,76

Joonis 4.1 esitab arvutustulemused graafiliselt reastades erinevad meetodikad soojuse osakaalu järgi.

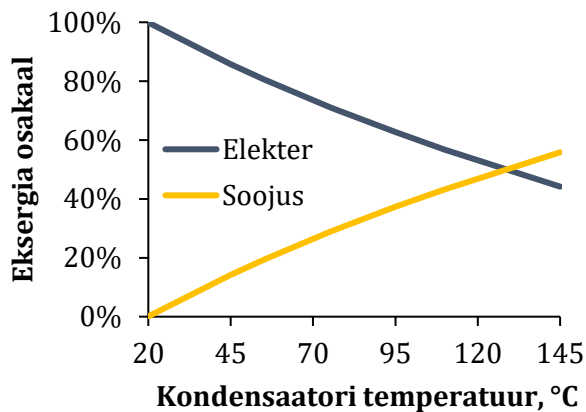


Joonis 4.1. Kulude jagamise meetodikate tulemused nominaalvõimsusel

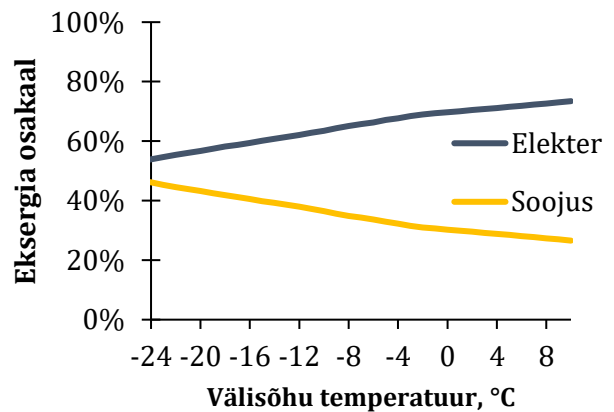
4.2. Eksergia meetodite tundlikkus

Eelnevas peatükis esitatud eksergia osakaalude tulemused on esitatud fikseeritud eeldustel ja lähteandmetel. Joonis 4.2 esitab kondensaatori temperatuuri (sh kaugküttevõrgu pealevoolu temperatuuri) mõju soojuse ja elektrienergia osakaalule. Mõjuanalüüsi tulemustest on näha, et soojuskandja suurema temperatuuri korral suureneb soojuse osakaal sisendenergiast. Sarnaselt reageerib ka soojuse eksergia meetod. Joonis 4.3 esitab välisõhu temperatuuri ja kaugküttevõrgu pealevoolu temperatuuri mõju soojuse ja elektri osakaalule. Soojuse eksergia meetodi sisendenergia soojuse osakaalu kaalutud keskmine arvestades välisõhu temperatuuride kestvustunde on 0,31.

Kahe eksergia meetodi võrdlemiseks võrreldakse tulemusi koostatud mudeli kaugküttevõrgu suurimal temperatuuril 110 °C ning aasta töötundidega kaalutud keskmisel temperatuuril 76,8 °C. Eksergia meetodil on soojuse osakaal sisendenergiast valitud temperatuuridel 0,43 ja 0,30. Soojuse eksergia meetodil on samad väärtused 0,47 ja 0,31. Madalamal temperatuuril annavad meetodid sarnasema tulemuse. Kõrgemal temperatuuril on tulemuste vahe 4%.



Joonis 4.2. Eksergia meetod

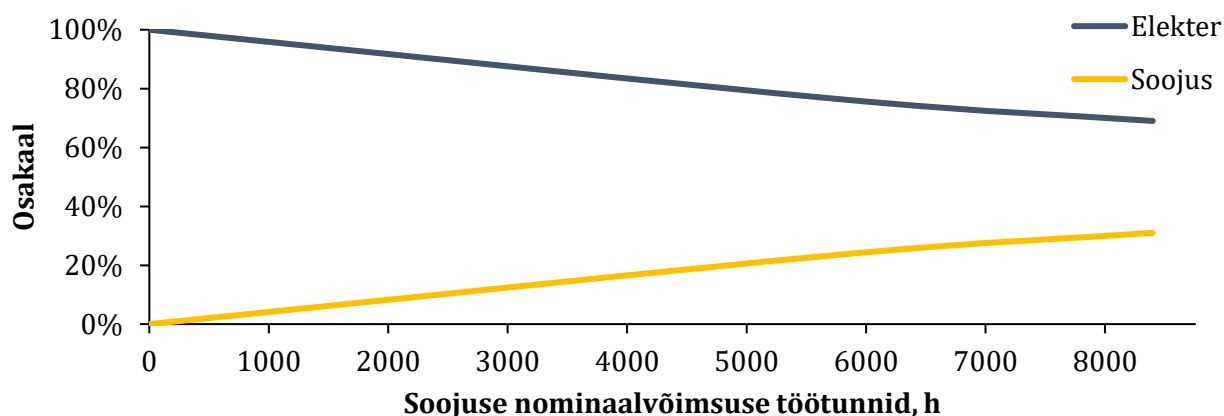


Joonis 4.3. Soojuse eksergia meetod

Tulemuste tõlgendamisel tuleb arvestada, et koostatud arvutused on tehtud nominaalvõimsusel. Kui arvutusvalemitesse sisestada mõõdetud energia kogused, siis tulemused muutuvad, sest koostootmisjaama kasulik soojuse toodang sõltub kütteperioodi välisõhutemperatuurist. Piisava jahutusvõimsuse korral on võimalik elektrienergia toodang hoida aasta läbi stabiilsena, kuid suveperioodil on kaugküttevõrgu tarbijatele võimalik toota ainult sooja tarbevee võimsust.

Joonis 4.4 esitab soojuse nominaalvõimsuse töötundide mõju sisendenergia soojuse osakaalule. Kuna eksergia ja soojuse eksergia võimsuse erinevus on olematu, siis energia koguse arvutamisel on lähtutud eksergia väärtusest. Elektrienergia aastane kogutoodang on arvatud 8400 töötunniga. Soojuse

aastane kogu- toodang on arvatud töötundide alusel. Suuremamahulises kaugküttevõrgus võib eeldada kuni 5800 töötundi täisvõimsusel ning väiksemamahulises kaugküttevõrgus kuni 3800 töötundi. 5800 soojuse nominaalvõimsuse töötunni juures on sisendenergia soojuse osakaal eksergia meetodil 0,24. 3800 töötunni juures on see 0,17.



Joonis 4.4. Soojuse nominaalvõimsuse töötundide mõju sisendenergia soojuse osakaalule

4.2.1. Füüsikalise ja alternatiivkatlamaja tundlikkus

Samal põhimõttel füüsikalise ja alternatiivkatlamaja meetodi valemite rakendamisel on füüsikalise meetodi soojuse osakaal sisendenergiast 0,66 ning alternatiivkatlamaja korral 0,40. 3800 töötunni korral on samad väärtused 0,55 ja 0,31. Mõlemal juhul vähenes soojuse osakaal nominaalvõimsuse väärtusest. See on eeldatav, sest praegused koostootmisjaamad on varustatud piisava jahutusvõimsusega, et tagada aasta läbi elektrienergia stabiilne tootlikkus suurimal võimalikul võimsusel, kuid soojustarbija tarbimisvõimsus sõltub kütteperioodi välisõhu temperatuurist.

4.3. Meetodikate võrdlus

4.3.1. Lihtsus

Lihtsasti arvatavad meetodid, mis vajavad analüüsitava koostootmisjaama andmeid, mis on Konkurentsiametil olemas:

1. Füüsikaline (soojus)
2. Energeetiline,
3. Soome,
4. Alternatiivkatlamaja,
5. 200% osakaal,
9. 250% osakaal,
10. Füüsikaline (elekter).

Keskmise keerukusega meetod, mis vajab Konkurentsiameti andmepäringus muudatusi:

7. Soojuse eksergia,

Keerukad meetodid, mis vajavad termodünaamika teadmiste rakendamist ning koostootmisjaama tootmisprotsessi tehnilisi parameetreid, mille konkreetsed väärtused on olemas ainult koostootmisjaama operaatoril:

6. Eksergia,
8. Dresdeni.

4.3.2. Seos termodünaamilise protsessiga

Meetodid, mis hõlmavad etalone või poliitiliselt fikseeritud väärtuseid, et tagada soojustarbijale koostootmise efekt, kuid ei arvesta konkreetse koostootmisjaama termodünaamilisi parameetreid:

- 3. Soome,**
- 4. Alternatiivkatlamaja,**
- 5. 200% osakaal,**
- 9. 250% osakaal.**

Meetodid, mis kasutavad toodetud energia koguseid, kuid ei arvesta koostootmise tehnoloogilist lahendust. Valemid ei arvesta, et elektrienergiat toodetakse kütuse primaarenergiast saadud soojuse arvelt ning soojustarbija seisukohalt oleks võinud soojust toota ka katlamajas.

- 1. Füüsikaline (soojus),**
- 2. Energeetiline,**
- 10. Füüsikaline (elekter).**

Meetod, mis kasutab kaugküttevõrgu parameetreid ja koostootmisjaamas toodetud soojuse kogust. Valem arvestab, et koostootmisjaamas toodetud soojus on elektrienergia tootmise jääk, mida kasutatakse efektiivselt kaugküttevõrgus. Valem arvutab hinnanguliselt kaugküttevõrku antava soojuse eksergia ehk koostootmisjaamas tootmata jäänud elektrienergia kaugküttevõrgu ja väliskeskkonna temperatuuri järgi ning omistab selle soojuse tootmise osakaaluks.

7. Soojuse eksergia

Meetodid, mis põhinevad konkreetsetel koostootmise tehnoloogial ja selle termodünaamilistel parameetritel. Meetodi valem arvutab termodünaamika seaduste järgi koostootmisjaamas kaugküttevõrgu parameetritest tingitud tootamata elektrienergia väärtuse ning omistab selle soojuse tootmise osakaaluks.

- 6. Eksergia,**
- 8. Dresdeni.**

4.3.3. Koostootmise arengud

Meetodid, mis soosivad madalatemperatuurse kaugküttevõrgu arenguid, sest arvestavad toodetud soojuse temperatuuri ning sellest tingitud primaarenergiaga säästu ja elektrienergia toodangu kasvu.

- 6. Eksergia,**
- 7. Soojuse eksergia,**
- 8. Dresdeni.**

Meetodid, mis ei arvesta, et elektrienergia tootmine võib tulevikus alternatiivselt toimuda ka kütusevabast allikast (lokaalselt või elektriturul):

- 3. Soome,**
- 4. Alternatiivkatlamaja,**

KASUTATUD ALLIKAD

1. Kalamees, T. Kurnitski, J. Estonian test reference year for energy calculations. [Online] <https://www.ekvy.ee/attachments/article/24/Eesti%20energiaarvutuste%20baasaasta.pdf>
2. Konkurentsiamet. Kulude jagamine elektri- ja soojuse koostootmise protsessis Balti Elektri jaama koostootmise ploki näitel. 2020.
3. Konkurentsiamet. Lisa 2 Läheteülesande muudatus 08.10.2020. 2020.
4. Konstantin P, Konstantin M. The Power Supply Industry: Best Practice Manual for Power Generation and Transport, Economics and Trade, lk 157-182. 2018.
5. KredEx. Tööriistad energiatõhususe mõõtmiseks. 2020. [Online] <https://www.kredex.ee/et/suurendame-teadlikkust-energiatohususest/tooriistad-energiatohususe-mootmiseks>
6. Ots, Arvo. Soojustehnika aluskursus, lk 157-165. TTÜ Kirjastus, Tallinn 2011. [Online] <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/dcc8e46a-a8ff-4eeb-a79a-1d31d6d0d7fc> (01.11.2020).
7. Riigiteataja. Majandus- ja taristuministri 13.12.2016. aasta määrus nr 71, „Soojus- ja elektrienergia töhuse koostootmise nõuded“ Lisa 1. 2016. [Online] https://www.riigiteataja.ee/aktilisa/1161/2201/6010/MKM_m71_lisa1.pdf# (01.11.2020).
8. Riigiteataja. Majandus- ja taristuministri 13.12.2016. aasta määrus nr 71, „Soojus- ja elektrienergia töhuse koostootmise nõuded“ Lisa 2. 2016. [Online] https://www.riigiteataja.ee/aktilisa/1161/2201/6010/MKM_m71_lisa2.pdf# (01.11.2020).
9. Riigiteataja. Soojuse müügi ajutise hinna kehtestamise kord. 2011. [Online] <https://www.riigiteataja.ee/akt/101072011020> (01.11.2020).
10. Tereshchenko. T. Energy Planning of Future District Heating Systems with Various Energy Sources, lk 87-93. Doctoral theses at NTNU. May 2016. [Online] <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2396299> (1.11.2020)
11. The International Association for the Properties of Water and Steam. [Online] <http://www.iapws.org/> (01.11.2020).
12. University of Alabama. Excel in Mechanical Engineering: Thermodynamics. 2020 [Online] <https://www.me.ua.edu/ExcelinME/thermo.htm> (01.11.2020).