



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Energiatehnoloogia instituut

ELEKTRIJAAAMAD. ÜLEVAADE ELEKTRI- JA SOOJUSENERGIA TOOTMISMAHTUDEST EESTIS

POWER STATIONS. AN OVERVIEW OF ELECTRICITY AND HEAT ENERGY
PRODUCTION CAPACITY IN ESTONIA

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Martin Keltman

Üliõpilaskood: 176532MASM

Juhendaja: Alar Konist, PhD

Tallinn 2019

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” 201.....

Autor: Martin Keltman

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja: Alar Konist

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201....

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Energiatehnoloogia instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Martin Keltman, 176532
Õppekava, peeriala: MASM, Soojusenergeetika
Juhendaja(d): Professor, Alar Konist, 5648 0478

Lõputöö teema:

Elektrijaamad. Ülevaade elektri- ja soojusenergia tootmiskahtudest Eestis

Power stations. An overview of electricity and heat energy production capacity in Estonia

Lõputöö põhieesmärgid:

- 1.
- 2.
- 3.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.		
2.		
3.		

Töö keel: Lõputöö esitamise tähtaeg: "....."201....a

Üliõpilane: Martin Keltman "....."201....a
/alkiri/

Juhendaja: "....."201....a
/alkiri

Konsultant:

"....."201....a

/alkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

SISSEJUHATUS	5
1. SOOJUSELEKTRIJAAM	6
1.1 Elektri tootmise ajalugu	6
1.2 Soojuselektrijaama tööpõhimõte	8
1.2.1 Rankine'i ringprotsess	12
1.3 Soojuselektrijaamade liigid	14
1.3.1 Põletamine liikuvrestil	15
1.3.2 Tolmpõletustehnoloogia	16
1.3.3 Keevkiht põletustehnoloogia	17
2. KOOSTOOTMISJAAM	21
2.1 Koostootmisjaamade ajalugu	22
2.2 Koostootmisjaama tööpõhimõte	24
2.3 Koostootmisjaamade liigid	26
2.3.1 Auruturbiiniga koostootmisjaam	26
2.3.2 Sisepõlemismootoriga koostootmine	27
2.3.3 Gaasiturbiiniga koostootmine	28
2.3.4 Mikroturbiinid koostootmises	30
2.3.5 Kütuseelemendiga koostootmisjaam	31
3. ELEKTRI- JA SOOJUSENERGIA TOOTMINE EESTIS	33
3.1 Elektritootmine Eestis	35
3.2 Koostootmine Eestis	39
3.3 Soojuselektrijaama koostootmisjaamaga asendamise arvutused	49
KOKKUVÕTE	52
SUMMARY	53
KASUTATUD KIRJANDUS	54

SISSEJUHATUS

Algne lõputöö teema sai valitud etteantud teemadest. Teema jäi silma, sest tahtsin uurida lähemalt erinevaid energiatootmis võimalusi ja uurida Eestis energeetilist seisut. Tänapäeval on tähtis energiat toota säästlikult ja võimalikult väheste keskkonna mõjudega, siis on koostootmine väga silmapaistev tehnoloogia esmaküljelt.

Käesolevas töös on lahti seletatud kust energia tuleb, kuidas seda toodetakse ja põhilised tehnoloogiad kui ka ressursid. Töös saab ülevaate ajaloost, tööpõhimõttest ja erinevatest liikidest.

Töös on välja toodud lähemalt Eestis elektri- soojusenergia tarbimisest, nende tootmisest ja energiaallikatest, millest toodetakse.

Töö eesmärk oli näidata elektri- ja soojusenergia tootmise seisut Eestis ja näidata kui küllastunud on koostootmise võimalused. Lisaks on tehtud ka väike põhimõtteline arvutus, millest järeldub koostootmisjaama negatiivne eeldusel, et soojust pole kusagil võimalik ära kasutada.

1. SOOJUSELEKTRIJAAM

Elektrijaam on elektrienergia tootmise ühest või mitmest tootmiseseadmest koosnev talitluskogum koos selle juurde kuuluvate abiseadmete ja rajatistega. Enamikes elektrijaamades on üks või mitu generaatorit, mis muundavad mehaanilise energia elektrienergiaks. Generaatori tööle panemiseks kasutatavad energiaallikad on väga erinevad. Enamik maailma elektrijaamu põletavad elektri tootmiseks fossiilkütuseid nagu kivisüsi, naftat või maagaasi. [1], [2]

Soojuselektrijaam on elektrijaam, kus soojusenergia muundatakse elektrienergiaks läbi generaatori, mis töötab turbiini jõul. Enamikes jaamades on auruturbiin. Soojuselektrijaamade projekteerimise suurim erinevus tuleneb erinevatest soojusallikatest; siin domineerib fossiilkütus, kuigi kasutatakse ka tuumaenergiat ja päikeseenergiat.

Soojuselektrijaamades toodetakse ligikaudu 80% kogu maailmas toodetavast elektrienergiast. Levinumad kütused soojuselektrijaamades põletamiseks on kivisüsi, pruunsüsi ja maagaas. [3] Soojuselektrijaamade kasutegur jääb üldjuhul vahemikku 30..45%. [3]

1.1 Elektri tootmise ajalugu

Elektri tootmine algas juba umbes 100 aastat tagasi. Benjamin Franklin oli mees, kes kahtlustas, et äikese ajal esinev piksenool on elektrivool, mis esineb looduses ja tahtis oma oletust testida. Ta katsetas, kas äike liigub mööda metalli. Tuulelohe kasutades tõestas ta, et välg on elektrivool, mis liigub läbi elektriseeritud õhu, mida me tänapäeval kutsume plasmaks. Franklini kuulus tuulelohe lend toimus 1752. aasta juunis. Pärast seda defineeris ta paljud tänapäeval laialdaselt kasutatavad terminid nagu näiteks: patareid, elektrijuht, kondensaator, laeng, elektrilöökk jne. [4]

Maailmas kõige levinum elektrienergia allikas on kivisüsi. Juba 17. sajandi lõpul kasutati kivisüsi aurumootorites. James Watt nägi selle tehnoloogia potentsiaali – ta võttis lihtsa torustiku süsteemi, mis oli mõeldud kaevandustest vee välja pumpamiseks ja kasutas seda ära tööstuses 18. sajandi lõpus. Leiutis muutis kivisöe eelistatuimaks energiaallikaks tööstuses. Richard Trevithick, järgides Watti algset disaini, võttis kivisöel töötava katla ja kombineeris selle tema enda poolt

modifitseeritud kaevanduses kasutatava vaguniga ja näitas sellega auru ära kasutamise võimalust transpordi sektoris. [5]

Aastatel 1883 – 84 tutvustas Thomas Edison maailma esimest kommertsiaalselt kasumlikku tsentraliseeritud süsteemi, mis võimaldab nii elektri kui ka soojusenergia jaotust tarbijateni. [4]

Esimesed kommertsiaalsed soojuselektrijaamad loodi aga 1882. aastal – New Yorgis Pearl Street'i ja Londonis Holborn Viaduct'i elektrijaam. Nendes kasutati aurujõul töötavaid kolbmootoreid. Need mootorid ei olnud aga sugugi optimaalsed elektri tootmiseks, kuna taoliste mootoriga oli raske saavutada suuri pöörlemissagedusi, mis on vajalikud generaatori efektiivseks tööks. Auruturbiini leiutamine 1884. aastal aitas kaasa suuremate ja efektiivsemate elektrijaamade projekteerimisele. 1892. aastaks peeti auruturbiini kolbmootorist paremaks; turbiinid pakkusid suuremat kiirust, kompaktsemat disaini ja stabiilsemat kiiruse reguleerimist, mis võimaldas mitme generaatori paralleelset töötamist. 20. sajandi alguseks olid suurtes elektrijaamades kolbmootorid täielikult asendatud turbiinidega. [6], [7]

Tänapäevane elektritootmise tööstus sai alguse 19. sajandi esimeses pooles tänu meestele nagu Benjamin Franklin, Alessandro Volta ja Michael Faraday. Eriti suur osa oli selles aga Faraday'l, kes suutis näidata elektri ja magnetismi vahelist seost, mis võimaldab elektrit toota liikuvast mehhanismist, mitte tollel ajal tavaks olnud keemiliste akude kaudu. [6]

Elektripirni leiutamine ja valgustuse laialdaselt kasutusele võtmine tekitas esimest korda võimaluse elektri kommertsialiseerimiseks, kuid see oli elektritööstusele ebapiisav alus. See, mis kiirendas elektrienergia tootmise kasvu, oli selle kasutamine transpordis. Trammide kasutusele võtmine ja Londoni maa-aluse raudteesüsteemi väljatöötamine olid sellised projektid, mis stimuleerisid suurte elektrijaamade ehitamist 19. sajandi kahel viimasel aastakümnel. [6]

20. sajandi alguseks olid välja töötatud sise põlemismootorid – sealhulgas nii otto- kui ka diiselmootorid, mida kasutati ka elektri tootmiseks. Enne Teist maailmasõda hakati kasutama ka tuulegeneraatoreid. 1950-ndate aastateni tuli põhiline elektrienergia maailmas kivisöe põletamisest, väike osa saadi ka naftast, maagaasist ning hüdroenergiast. [6]

1950-ndatel algas tuumaenergia ajastu. Sel ajal loodi tuumaelektrijaamade printsip, mis tähendas ka kohest jaamade ehituse kiirenemist. Uudne energiaallikas oli odav, keskkonnasäästlik, tehniliselt põnev ja väljakutsuv. Tuumaenergia arenes kiiresti kuni 1970-ndate lõpuni kogu maailmas.

Kümnendi lõpupoole hakkas see oma hiilgust kaotama ja areng aeglustus; seda väljaarvatud Aasias, kus tuumaenergia arendus jäi püsima. [6]

1973. aastal puhkes Lähis-Idas sõda, mis tõi kaasa nafta drastilise hinnatõusu. Selle kallinemine tõi omakorda kaasa alternatiivsete energiaallikate otsimise riikides, kus nafta oli energeetikas domineeriv. Energiaallika alternatiividena jäid peale päikese- ja tuuleenergia, kui ka etanool, mida saab toota põllusaadusest. Päikese- ja tuuleenergia arendamine, kuniks need olid nii tehniliselt kui ka majanduslikult kasumlikud, võttis aega sajandi lõpuni. Lootus jäi 21. sajandisse, et nendest saadav energiahulk muutuks konkureerivaks fossiilkütustega. [6]

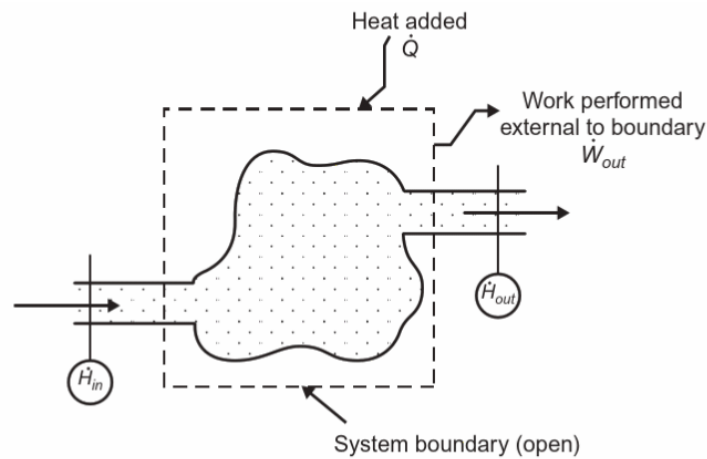
Keskkonnamõjud hakkasid suuremaks probleemiks muutuma 1980-ndatel aastatel. See sundis energiatööstust vähendama fossiilkütustel töötavate elektrijaamade emissioone. Tänu sellele arendati välja kombineeritud tsükliga jaamad, mis töötavad nii gaasiturbiiniga, kui ka auruturbiiniga. Gaasiturbiini puhul on tegemist põhimõttega, mis töötati välja Teise maailmasõja ajal lennunduses ning sai kiirelt rakenduse elektrinõudluse tippude katmiseks elektrijaamades. Kombineeritud tsükliga jaamu kasutatakse nüüdisajal riikides, kus maagaas on kergesti kättesaadav. [6]

21. sajandi algusaastad on näidanud suurt huvi taastuvenergia allikatele. Kütuselemendid on tehniliselt väga arenenud ja hakkavad jõudma kommertsiaalse kasumlikkuseni. Avamere tuuleparke on hakatud ehitama üle Euroopa. Käesoleva sajandi põhiline võitlus on ikkagi uute energiaallikate ja vanade domineerivate fossiilkütuste vahel. Paljulubav on ka tuumasünteesi baasil tuumaelektrijaamad, mis pole veel oma potentsiaali suutnud tõestada. [6]

1.2 Soojuselektrijaama tööpõhimõte

Termodünaamika kui teadus hõlmab üldisi mõisteid ja seaduseid, mis kirjeldavad energia muundumist ühest liigist teise, nagu näiteks soojusenergia muutumine mehaaniliseks energiaks läbi auru- või gaasiturbiini ning kütuse põlemisel keemilise energia muutumine soojuseks. [8]

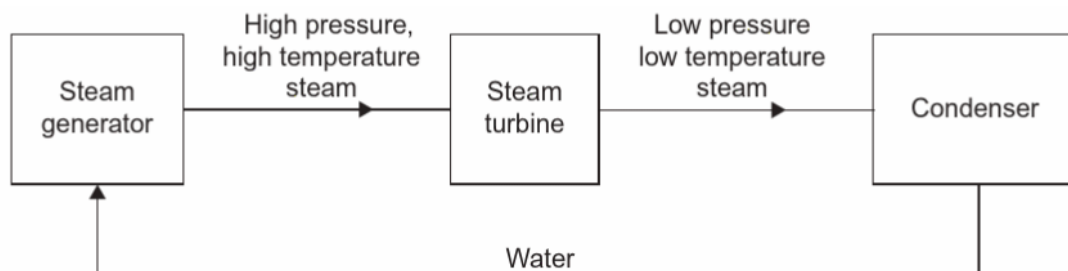
Termodünaamilisi süsteeme on kaks – avatud ja suletud. Avatud süsteemis, mida on kujutatud joonisel 1, ei ole termodünaamilise keha mass konstantne, vaid liigub süsteemi sisse ja väljub, nagu näiteks auru liikumine läbi auruturbiini. Kinnises süsteemis on mass aga konstantne terve vaadeldava või uuritava süsteemi vältel, nagu näiteks auru paisumine ja komprimeerimine aurukolbmootoris. Tuleb aga mainida, et nii avatud kui ka suletud süsteemides soojus/töö võib ületada süsteemi piire. [8]



Joonis 1. Avatud termodünaamiline süsteem. Q on lisatav soojushulk ja W tehtav töö.[8]

Kui süsteem läbib protsessis mitmeid olekuid või mitmeid protsesse sel viisil, et lõppolek on identne algolekuga ja on suuteline seda uuesti kordama, siis on süsteem teinud ringi ja tegu on ringprotsessiga. Protsess, mis toodab soojusenergiast tööd, kutsutakse soojusmootoriks ja selle töö on positiivne. Kui tööd tehes aga eraldub soojus protsessi, siis representeerib see soojuspumpa ning selle töö on negatiivne. [8]

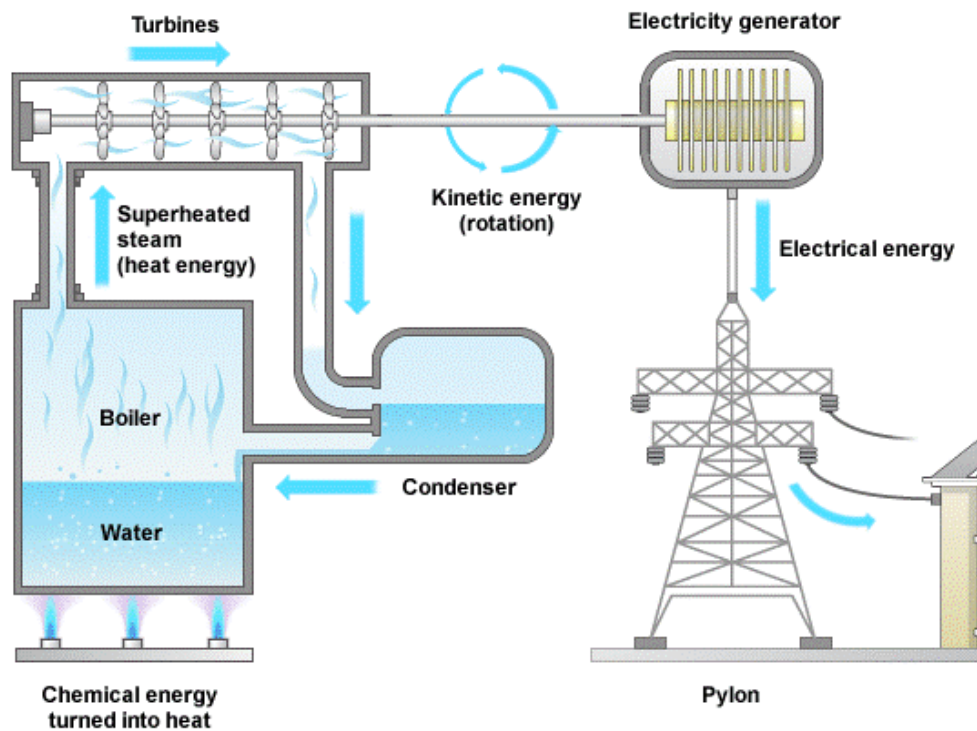
Lihtsalt öeldes, soojuselektrijaamas liigub termodünaamiline keha (milleks on tavaliselt vesi) mööda pidevat mehaanilist ja termodünaamilist ringprotsessi, mille käigus läbib keha erinevaid faase ja olekuid. [8]



Joonis 2. Lihtsa soojuselektrijaama põhimõtteline skeem.[8]

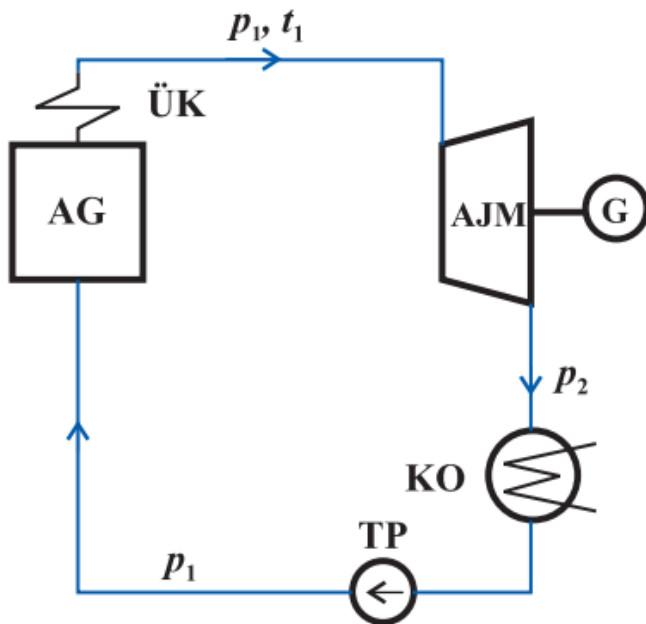
Soojuselektrijaamas muundatakse kütuse siseenergia koldes põlemisprotsessil soojusenergiaks. Vabanenud soojusenergia liigub vette läbi küttepindade, mis asuvad katla sees. Vee siseenergia suurenedes läheb vesi keema ja muutub veeauruks. [9]

Veeauru siseenergia muundatakse düüsidest auru kineetiliseks energiaks ning see suunatakse turbiini, kus energia muutub turbiini rootori pöörlemiseks. Jõuülekandemehhanismidega antakse pöörlemisenergia edasi elektrigeneraatorisse, kus see muutub elektrienergiaks ning mis kõrgepingeks transformeerituna suunatakse vahelduvvoolu võrku. [9]



Joonis 3. Lihtsustatud soojuselektrijaama skeem. [9]

Soojuselektrijaama lihtsamalt kutsudes on see lihtsalt aurujõuseade. See on süsteem, milles on omavahel ühendatud mitu erinevat funktsiooni täitvat seadist. Joonisel 4 on toodud elementaarse aurujõuseadme skeem, milles on neli omavahel ühendatud osa. [10]



Joonis 8.1. Elementaarse aurujõuseadme skeem:

**AG – aurugeneraator,
 ÜK – auruülekuumendi,
 AJM – aurujõumasin,
 KO – kondensaator,
 TP – toitepump,
 G – elektrigeneraator**

Joonis 4. Aurujõuseadme elementaarne skeem. [10]

Esimeseks lüliks skeemis tuleks pidada aurugeneraatorit – AG ehk aurukatelt, kus pumbatav toitevesi kuumutamisel aurustub. Protsess tervikuna – vee kuumutamine, aurustumine ja auru ülekuumendamine aurugeneraatoris, on püsirõhuline ehk isobaarne termodünaamiline protsess. [10]

Joonisel 4 on välja toodud ka auruülekuumendi ÜK, mis on osa aurugeneraatorist ja olenevalt süsteemist võib see ka puududa. Aurugeneraatoris rõhk on p_1 , mis on ühtlasi ka aurugeneraatorist väljuv rõhk, ning temperatuur t_1 on aurugeneraatorist väljuva auru temperatuur. Suurused p_1 ja t_1 on algparameetrid ja nende parameetritega siseneb aur jõumasinasse, milleks on üldjuhul turbiin. [10]

Aurugeneraatorist väljuv aur on kas küllastunud või ülekuumendatud. Esimesel juhul on aurul tema rõhule vastav küllastustemperatuur ja seadmel puudub sel juhul ülekuumendi. Sellised jõuseadmed on enamasti kasutusel tuumaelektrijaamades. Ülekuumendatud auruga töötavas jõuseadmes on ülekuumendist väljuval aurul rõhule vastavast küllastustemperatuurist kõrgem temperatuur. Kui aga rõhk aurugeneraatoris on vee kriitilisest rõhust kõrgem, siis kulgeb kuumutusprotsess faasimuunduseta, kuid sellisel juhul ei saa auru temperatuur aurugeneraatorist väljumisel olla madalam vee kriitilisest temperatuurist. Nüüdisaegsed fossiilkütust põletavad elektrijaamad töötavad eranditult ülekuumendatud veeauruga, olenemata auru rõhust aurugeneraatoris. [10]

Edasi suundub aurugeneraatorist aur aurujõumasinasse (AJM), milleks on tänapäeva soojuselektrijaamades üldiselt auruturbiin. Turbiini siseneva auru rõhku võib lihtsuse mõttes pidada võrdseks aurugeneraatori rõhuga. Turbiinis paisub aur adiabaatselt (puudub soojusvahetus keskkonnaga ja energia muutub ainult tööks) algrõhult p_1 ja algtemperatuurilt t_1 rõhuni p_2 tehes seejuures tehnilise töö l_1 . Auruturbiini võllilt antakse kasulik töö üle elektrigeneraatorile G. [10]

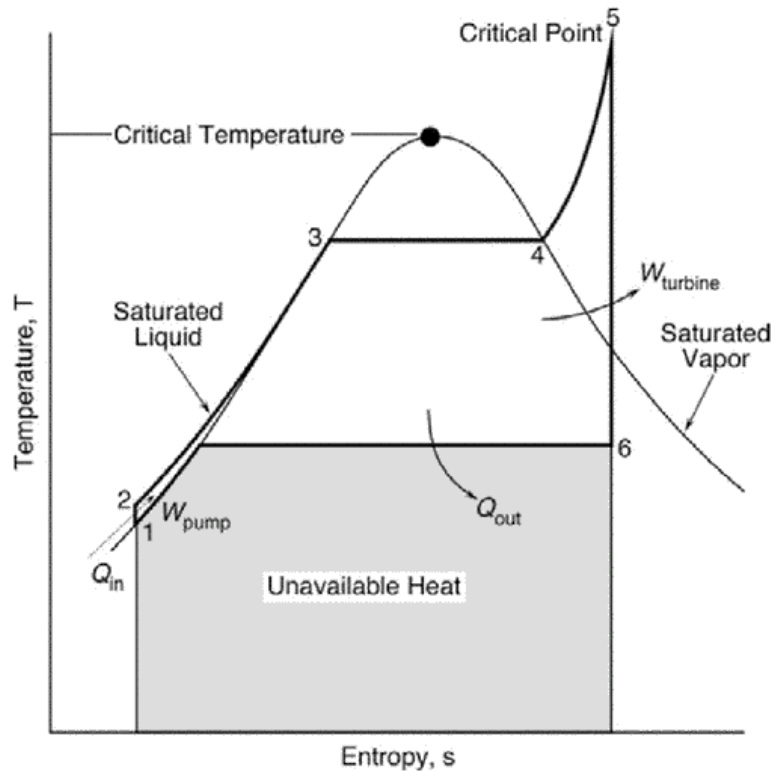
Auruturbiinist väljuv aur kondenseeritakse kondensaatoris KO. Protsess toimub püsirõhul p_2 , mis on rõhk auruturbiinist väljumisel. Kondensaatori rõhu määrab ära peamiselt jahutusagensi temperatuur ja soojusülekanne tingimused. Tavaliselt on rõhk 2-4 kPa ringis. Jahutusagensiks on üldiselt vesi, mis tuleb looduslikust veekogust või inimtekkelisest veehoidlast. Kui jahutusvesi pole suuresti kättesaadav, siis kasutatakse ka gradiiri ehk jahutustorni. Ajaühikus kondensaatorit läbiva jahutusvee massi suhet auruturbiinist väljuvasse ja kondensaatoris samal perioodil veelduvasse aurumassi nimetatakse jahutusvee ringlus- ehk tsirkulatsioonikordarvuks. See asub tavaliselt piirides 40–120, seega 1 kg auru kondenseerimine kondensaatoris vajab 40–120 kg jahutusvett. Siit tuleneb ka vajadus rajada võimsad soojuselektrijaamad võimalikult suure loodusliku veekogu lähedale. [10]

Vesi pumbatakse toitepumba TP abil kondensaatorist aurugeneraatorisse tagasi. Pumba siseneb kondensaator rõhuga p_2 ja pump tõstab vee rõhku adiabaatselt rõhuni p_1 , mis siseneb aurugeneraatorisse. Protsess tarbib tööd l_p . [10]

1.2.1 Rankine'i ringprotsess

Soojuslik kasutegur näitab soojuselektrijaama jõudlust. Eelnevalt kirjeldatud aurujõuseade töötab enimtuntud Rankine'i ringprotsessi põhimõttel. Selle töötas välja J. M. Rankine 1859. aastal. Gaasiturbiinid töötavad Brayton'i tsükli peal. Need ringprotsessid kirjeldavad, kuidas kütuse keemilisest energiast tehakse mehaanilist energiat, mis omakorda muudetakse elektrienergiaks. [11], [12]

Rankine'i ringprotsessi alusel töötavad kõik suuremad soojuselektrijaamad ja sellel on erinevaid variatsioone. Tavalist Rankine'i tsüklit on näha joonisel 5. [11]



Joonis 5. Ideaalse Rankine'i ringrotsessi temperatuur-entroopia (T-s) diagramm. [11]

Termodünaamiline keha (vesi) komprimeeritakse katlas olevale rõhule (1 – 2). Seejärel liigub vedelik katlasse, kus seda kuumutatakse püsival rõhul (2 – 3). Punktis 3 muutub keha kahefaasiliseks (vedelik, gaas) ja seda kuumutatakse edasi, kuni kõik vedelik on aurustunud (3 – 4). Siis liigub see ülekuumendisse, kus kuumutatakse keha veelgi (4 – 5). Pärast ülekuumendamist liigub aur turbiini, kus see paisub ja teeb tööd (5 – 6). Peale turbiini, kui keha on kasuliku töö ära teinud, läheb see kondensaatorisse, kus aur kondenseerub püsival rõhul ja temperatuuril, kuniks on tekkinud küllastunud vesi ja jääsoojus on heidetud keskkonda (6 – 1). [11]

Termodünaamiline kasutegur, mis on toodud valemis 1.1, sõltub süsteemi soojuse lisamise ja eemaldamise temperatuuridest: [11]

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (1.1)$$

Valemis 1 on T_1 soojusallika absoluutne temperatuur ja T_2 on absoluutne soojuseraldi temperatuur. Valemist lähtuvat on võimalik kasuteguri tõstmiseks kolm lähenemisviisi: vähendada T_2 temperatuuri, tõsta T_2 või mõlemat korruga. T_1 temperatuuri eriliselt parandada ei saa, sest see sõltub keskkonnast, kuhu soojust peale ringprotsessi eraldatakse. Seega, et tõsta kasutegurit peab tõstma T_2 temperatuuri. [11]

1.3 Soojuselektrijaamade liigid

Soojuselektrijaamu liigitatakse tavaliselt kütuseliigi või põletustehnoloogia järgi. Jaamades kasutatakse:

- kivisüsi,
- põlevkivi,
- nafta produkte,
- tuum kütuseid,
- geotermaalset soojust,
- päikeseenergiat,
- prügi,
- maagaasi.

Siinkohal tuleks märkida, et on kirjeldatud pikemalt ainult tahkekütuse üldlevinumatest põletusliikidest põlevkivi põletamise näitel Eestis. Kuna põlevkivi on väga problemaatiline kütus, jääb väga palju tuhka üle ja selle kütteväärtus on ka suhteliselt madal.

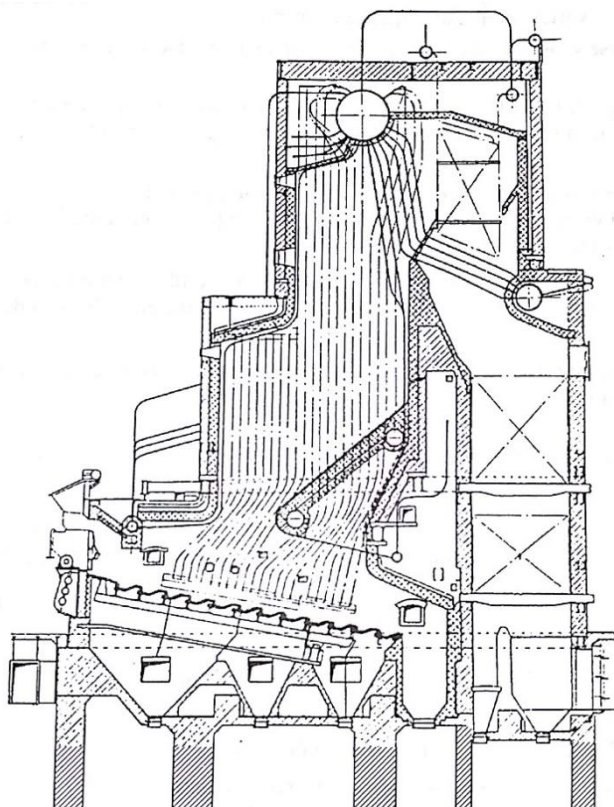
Põlevkivi on orgaanilisi ühendeid sisaldav peeneteraline settekivim, mis sisaldab kerogeeni (tahke segu orgaanilistest ühenditest). Selle kütteväärtus on 5-10 MJ/kg. [13], [14]

Põlevkivi eripära on tema orgaanilise aine halb lahustuvus tugevates lahustites ja võrreldes huumuskütustega, vesiniku- ja hapnikurikkus. Tema vesiniku ja süsiniku aatomsuhe on umbes 1.5, mis on peaaegu võrdne toorõli samade elementide aatomsuhtega ning see põhjustabki suure õlisaagise põlevkivi termilisel lagunemisel (kivisöel on selleks suhtearvuks vaid 0.3 - 0.4). Temperatuurivahemikus 250 – 450°C muutub lahustumatu kerogeen osaliselt lahustuvaks termobituumeniks, kusjuures muundumise käigus eraldub ka väike osa lendainest. [14]

Põlevkivi kõrgmolekulaarse orgaanilise osa põhiline termiline lagunemine leiab aset temperatuurivahemikus 450 – 500°C, kus tekib õli ja koks ning eralduvad gaasilised osised. [14]

1.3.1 Põletamine liikuvrestil

Põlevkivi restküttekatla tüüpkonstruktsioon on toodud joonisel 6. Koldes asuvad põiktrumliga ühendatud ekraanitorud on põhiliseks aurustusküttepinnaks, kuid seda funktsiooni täidab ka kolde järel paiknev konvektiivtorukimp, mille



aurustuspinna vahel asetseb auruülekuumendi soojusvahetuspind. Põlemisgaas liigub edasi ribitoru malmökonomaiserisse. Viimaseks küttepinnaks on regeneratiivne õhuelsoojendi, mis kujutab endast pöörlevat plaatsoojusvahetit. [14]

Põlevkivi põletamisel restkoldes vabaneb soojus peamiselt koksi ja teatud määral ka lendosa põlemisest, mis teeb oluliseks kütusekihist väljuva põlevgaasi lõpuni põletamise koldekambris. Nimelt tuleb põlemisgaas korralikult õhuga segada ning kasutada gaasi põlemisaja suhtes piisava ruumalaga põlemiskambrit; seda väljendab kaudselt koldekambri soojuslik mahterikoormus. [14]

Kolderuumi liiguvad kihi pealispinnalt lisaks põlevgaasile ka põlemata kütuseosakesed ja põlemisest ülejäänud hapnik. Hapniku kontsentratsioon on kihist lahkuvas gaasis kõrgeim kütuse kuivamise, kuumenemise ja šlaki jahtumise tsoonis ning madalaim lendosa eraldumise tsoonis. [14]

Koldekambris võib leegi temperatuur kerkida 1300°C-ni. Kõrguse kasvades põlemisgaasi temperatuur langeb ja jääb sisenemisel konvektiiv-torukimpu vahemikku 850 - 1000°C. [14]

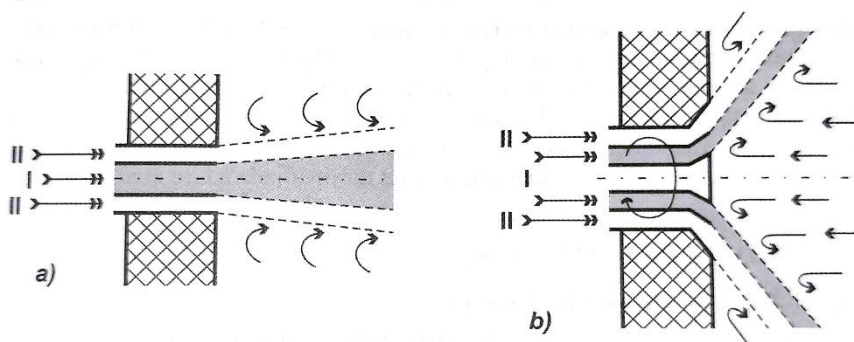
Restipinna suuruse ülempiir määrab kihtkoldega katla piirvõimsuse, mis aga hakkas pärssima elektrijaamade turbogeneraatorite ühikvõimsust. Lahenduseks ei ole ka suurema arvu katelde kasutamine, sest nende paralleelne käitamine muutuks keerukaks. [14]

Praeguseks kasutatakse respõletustehnoloogiat eelistatult väikevõimsusega kateldes, eriti biokütuste ja turba põletamisel. [14]

1.3.2 Tolmpõletustehnoloogia

Levinuimaks põletustehnoloogiaks on tänapäeval tahkekütuste tolmustatud kujul põletamine tolmküttekoldes, mille populaarsuse tingib ka kirjeldatud restkolde piiratus. Tolmpõletusel on määrav aga kolde maht, mida on võimalik kolde kõrgendamisega suurendada. [14]

Tolmküttekolde ehk kamberkolde on ekraansoojusvahetuspinnaga ümbritsetud ja põletitega seadistatud kamber, kus kütuse põlemisega samal ajal kantakse põlemisgaasilt soojust koldeekraanile. Koldeks on püstristtahukakujuline kamber, kus tavaliselt voolab põlemisgaas alt üles. Läbi koldekambri tagaseinas või vastasseintes asuva väljumisakna väljub gaas. [14]



Joonis 7. Tolmu süttimise skeem. a – otsevoolupõleteti; b – turbulentne keerispõleteti.
I – aroosegu; II – sekundaarõhk. [14]

üles. Läbi koldekambri tagaseinas või vastasseintes asuva väljumisakna väljub gaas. [14]

Põlemisgaas koos väiksema hõljumiskiirusega tahkeosakestega liigub otse läbi kolde ja küttepindade ning koldeaknast väljuva tuha puhul on tegemist lendtuhaga. Koldepõhja sadestuvate suuremate osakeste tuhka nimetatakse šlakiks, räbuks või põhjatuhaks. [14]

Kolde esiseinas asuv otsevoolu- ehk ambrasuurpõleti suunab gaaside segu koldesse ning selles asetsevad sekundaarõhu düüsid. Iseloomulikuks on sekundaar- ja primaarõhu kiiruse suur suhe 5-8. [14]

1.3.3 Keevkiht põletustehnoloogia

Keevkiht põletustehnoloogia tahkekütustega on laialdaselt kasutatav ning pidevalt täiustatav. Selle tehnoloogiaga on edukalt võimalik põletada madalakvaliteetseid kütuseid ning teha seda ilma kalleid põlemisgaasi lisapuhastusseadmeid vajamata keskkonnasõbralikumalt. [14]

Keevkiht on pulseeriv aerodünaamiline süsteem, mis koosneb gaasivooluses asuvast tahkeosakeste hõljumist ning millel on mõningad vedelikele sarnased omadused (pseudovedelik). [14]

Ilma kõrge temperatuurita on võimalik süttimistemperatuuril kütuse kihti suunamisel saavutada pidev põlemine. Keevkiht võib moodustuda kas sihtotstarbelisest materjalist, nagu näiteks liiv, kütuse tuhast või muul moel. Keevkihis on sageli temperatuuriks 750-950°C, mille suhteliselt madal väärtus on võimaldatud intensiivse soojusülekanne poolt keskkonna ja osakeste vahel ning mis sõltub kasutatava kütuse omadustest. [14]

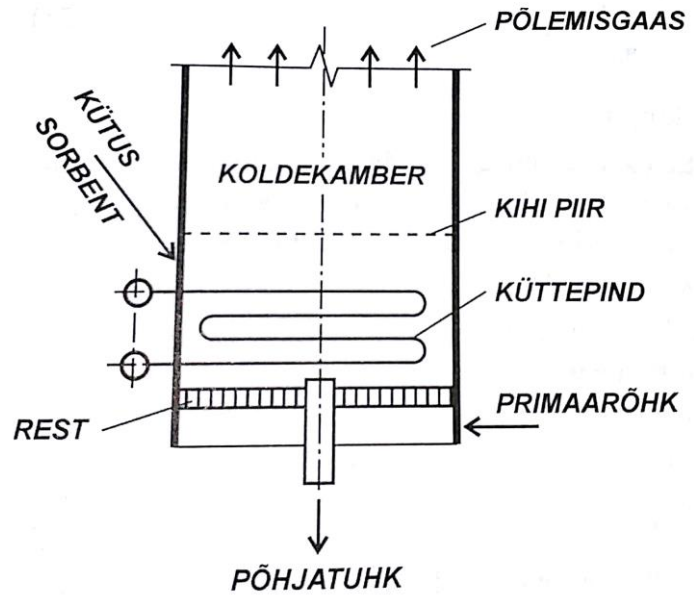
Keevkiht kui heterogeenne süsteem võib eksisteerida kahe piiroleku vahel (tahke ja gaasifaas). Tahkeosakesed on seisvas kihis ning gaasifaasis toimub pneumotransport, kus tahkeosakesed kanduvad gaasiga koos süsteemist välja. Osakeste omadused, nagu nende mõõtmed ja tihedus, määravad kahefaasilise süsteemi aerodünaamilised olekud, mis jagatakse nelja kategooriasse: liikumatu kiht, agregeeritud keevkiht, kiirkeevkiht ja pneumotransport. Agregeeritud keevkiht jaguneb omakorda homogeenseks, heterogeenseks, kihiliseks ja turbulentseks režiimiks. [14]

Klassikaline keevkiht

Joonisel 8 on kujutatud klassikalise keevkihi põletusseade, mille põhiosa resti kaudu siseneb kihti suure aerodünaamilise takistusega ja koldesse siseneva õhu jaotumist ühtlustav primaarõhk. Selle

rõhk peab ületama resti ja kihi aerodünaamilist takistust. Koldesisene temperatuur on 750-950°C. [14]

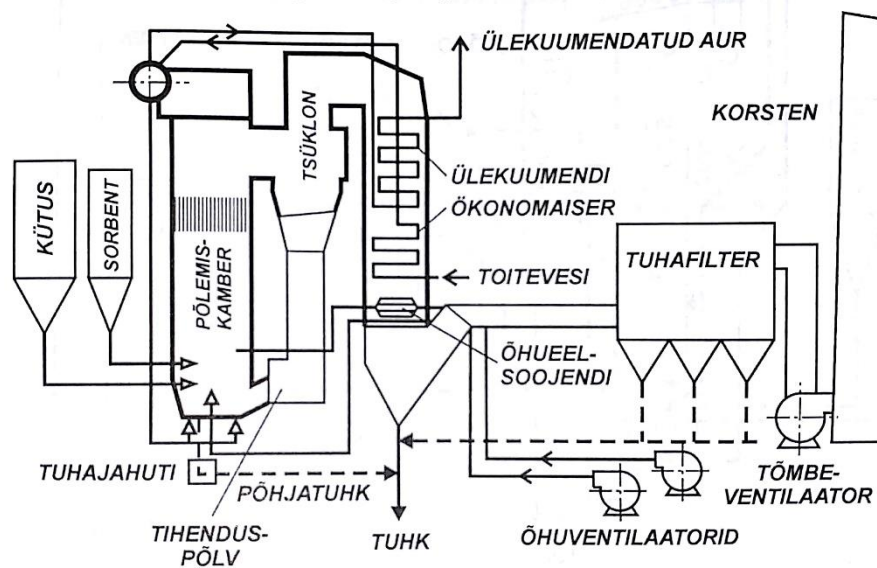
Lisaks kütuse täiuslikumale põletamisele ja kahjulike gaasiheitmete väiksemale hulgale võimaldab klassikaline keevkihtkolle ka stabiilset temperatuurirežiimi ja head soojusülekanne. [14]



Joonis 8. Klassikaline keevkiht. [14]

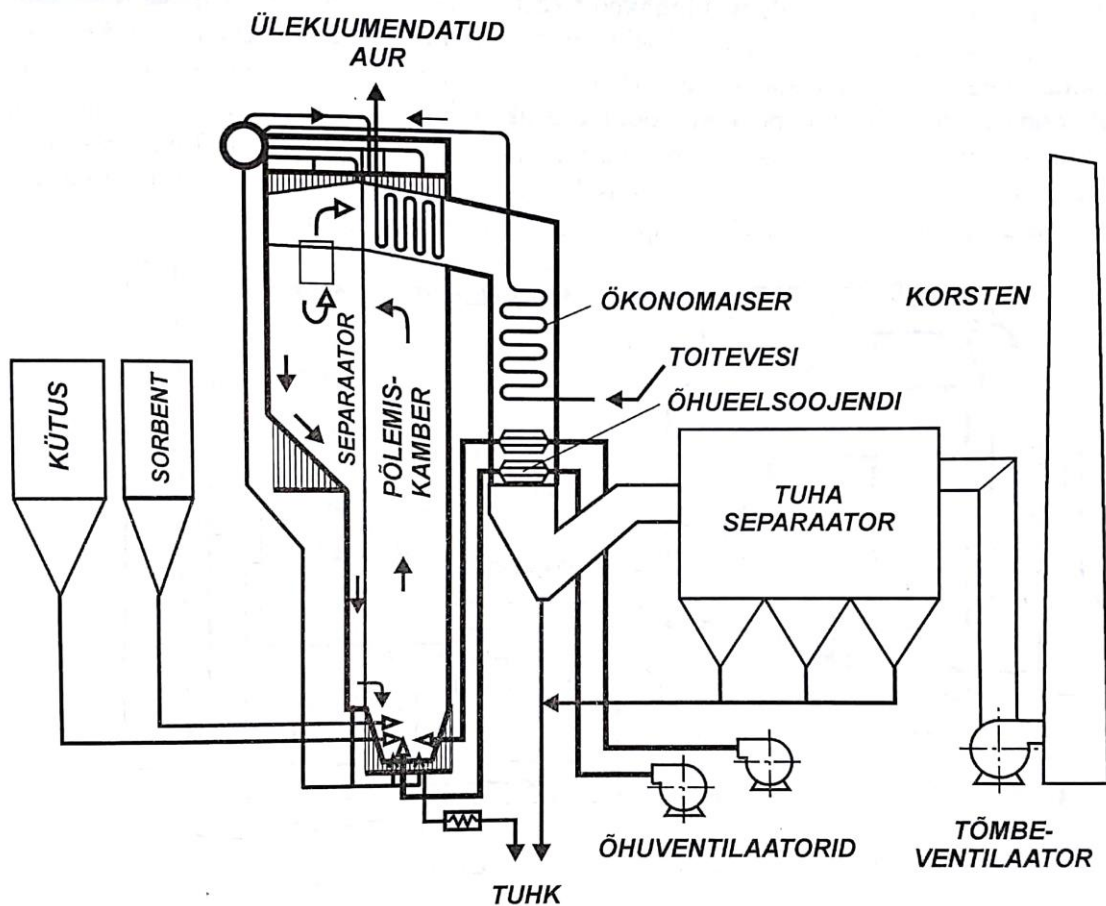
Klassikalise tsirkuleeriva keevkihiga

kolle koos sellele järgneva katla konvektiivküttepinnaga on toodud joonisel 9. Restile viiakse kütus ja vääveldioksiidi absorbent. Keeskihi tekitamiseks suunatakse resti alla primaarõhk; restipealsesse ruumi põlevgaasi komponentide ja orgaanilist ainet sisaldavate tahkeosakeste järelopõletamiseks sekundaarõhk. Põlemisgaas liigub koldest koos tahkeosakestega tsüklon-separaatorisse, kust läbi tihendussõlme juhitakse suuremad ja raskemad osakesed tagasi kolde alla. Tekkivas tsirkulatsioonis jõutakse tahkekomponendi vooluse tasakaaluni osakeste pideva väljumise teel separaatorist. Katla küttepinda juhitakse tsüklonist väljuv põlemisgaas koos tahkeosakestega. [14]



Joonis 9. Koldevälise tsüklon-separaatoriga tsirkuleeriv keevkiht katel. [14]

Koldesise sepaatoriga tsirkuleeriva keevkihiga kolde ja selle järel asetseva konvektiivküttepindadega katla skeem on toodud joonisel 10. Väljumisakna kaudu suunatakse põlemisgaas sepaatorisse, kust osakesed suunatakse tagasi koldesse. [14]



Joonis 10. Koldesisesega separaatoriga tsirkuleeriva keevkihiga katel. [14]

Sellises koldes on soojuskoormus on hästi reguleeritav (minimaalne koormus kuni 20% nimikoormusest). Koormuse alanedes gaasi kiirus väheneb ning protsess hakkab võtma klassikalise keevkihi kuju. [14]

Õhk-keevkiht soojusvahetid, mis on asetatud separaatoris välja sadenenud osakeste tagasivoolule, on levinud tänapäevastes tsirkuleeriva keevkihiga kolletes. [14]

2. KOOSTOOTMISJAAM

Elektri tootmine fossiil-, biomassi või tuumkütustest on väga ebaefektiivne protsess. Mõned üksikud modernsed elektrijaamad võivad saavutada kasuteguri kuni 60%, kuid enamik maailma elektrijaamu töötab 30% ja väiksemad jaamad isegi vaid 20% juures. Teisti öeldes umbes 40% kuni 80% kogu kütuse energiast läheb kaduma. Põhimõtteliselt kõik kaod muutuvad lõpuks soojuseks, mida ei saa kasutada, ehk jääsoojuseks, mis tihtipeale paisatakse atmosfääri. Seda soojust võib ka nimetada kui üheks reostuse liigiks. [6]

Jääsoojuse baasil ei saa toota elektrit, kuid seda on võimalik teisiti ära kasutada. Madalama potentsiaaliga soojust saab ära kasutada tarbevee kütmiseks või kütteks. Kõrge potentsiaaliga soojust saab ära kasutada vee aurustamiseks mida saab ära kasutada teised tööstused. Sellisel viisil saab jääsoojust ära kasutada teistes tööstuslikes protsessides, mis muidu vajavad eraldi energiaallikat, et toota soojust või auru. Selle tulemusena tõuseb üldine energia kasutamise efektiivsus. [6]

Lihtne näide sellise jääsoojuse ära kasutamisest on auto. Inimeste ja salongi soojendamine toimub puhtalt läbi mootori jääsoojuse, mis ei mõjuta kütusekulu ega kasutegurit. Kui aga sellist soojust ei kasutata ära, peaks autosse paigaldama eraldi küttekeha, mis tarbiks kütust ning sellega suureneks ka kütusekulu. [15]

Koostootmine on tavaliselt defineeritud kui kahe või enama kasuliku energialiigi tootmine samast kütusest. Toodetavateks energialiikideks on põhiliselt soojus- ja elektrienergia. Selle tulemusena suureneb kasutegur kütuse ühiku kohta, sest koguenergia, mis sellest saadakse (soojus ja elekter), on suurem kui lihtsalt elektritootmine. Koostootmise efektiivseks rakendamiseks peab olema spetsiifiliselt disainitud turbiin, mis suudab toota nii vaid elektrit, kui ka elektri tootmise kõrvalt kasulikku soojust toota. Koostootmisjaamad on väga suure potentsiaaliga külmates regioonides, nagu Skandinaavia ja Ida-Euroopa, kus talv on pikk. Koostootmise eelistest hoolimata on jaamu vähem kui 10% kogu elektrijaamadega võrreldes – paljudes riikides isegi vähem. [16], [17]

Osa probleemist tuleneb suurte elektrijaamade eelistusest väiksemate ees. Sellised jaamad on disainitud töötamiseks koostöös elektrivõrgu nõudlusega ja firmadega, kes neid võrke omab. Harv nähtus on suures elektritootmises jääsoojuse ära kasutamine. Kui aga elektrinõudluse rahuldamine

jaotatakse ära väiksemate jaamade vahel ära, on võimalik koostootmine. Väiksemad jaamad asuksid kohtades, kus on nõudlust soojuste järgi. [6]

Nüüdisajal on maailmas suureks mureks kasvuhoonegaaside atmosfääri paiskamine. Koostootmine toodab elektrit palju suurema kasuteguriga, kui seda on saavutatud tavaliste soojuselektrijaamadega. Seega tuleks koostootmist veelgi laialdasemalt propageerida. [16]

Koostootmissüsteemil on elektrilise tootlikkuse poolest väga paindlik – 1 kW elektriline võimsus kuni 400 MW. Süsteemid võivad sisaldada auru-, gaasiturbiine, sisepõlemismootoreid, kombineeritud tsükli, mikroturbiine, kütuseelemente jne. [15]

2.1 Koostootmisjaamade ajalugu

Elektritootmise jaotamist väiksemate jaamade vahel pole kaugeltki uus mõte, seda kutsutakse hajaenergiaks. [6]

Elektri ja soojuste tootmise potentsiaali nähti elektritootmise algusaastatel. Ameerika Ühendriikides hakati 19. sajandi lõpus ära kasutama elektritootmise jääksoojust hoonete ja tarbevee kütmiseks tänu linnavalitsustele, kes selle võimalikkust nägid. Selliseid kaugkütte süsteeme hakati peagi kasutama ka mujal maailmas. [6]

Töötavate alternatiivide puudumise tõttu 19. sajandi algusaastatel võtsid paljud väikesed ja ka suured tööstused kasutusele koostootmise, et toota samal ajal nii elektrit kui ka soojust. Soojuselektrijaamade suure arenduse ja töökindlate elektrijaotusvõrkude tekkimise tõttu aga algne huvi koostootmise suunal kadus. Odavam oli osta elektrit võrgust ja toota ainult soojust ise, kui teha seda samaaegselt. [16]

Ühendkuningriikides tekkis inseneridel koostootmisest tulevikuvision. Kahjuks oli selle omistamine aga aeglane ning kaugkütte sai alles aastal 1911 elektrijaamade kõrvalt mingi tähtsuse. 1911. aastal sai valmis ka Manchesteri linna kaugküttesüsteem. Kütuse nappus peale Teist Maailmasõda ning tollane majanduskriis muutis Euroopas atraktiivsemaks 1920-ndatel ja 1930-ndatel aluse saanud koostootmise. Tehnoloogia implementeerimine oli aga vähene ja osaline. [6]

1950-ndate aastate keskpaigaks oli kaugküttesüsteeme, mis kasutasid koostootmise põhimõtet, rajatud mõnesse linna Ameerika Ühendriikidesse, Euroopa riikidesse, nagu Saksamaa ja Venemaa ning ka Skandinaaviasse. Kuid paljudes riikides, nagu näiteks Ühendkuningriikides, ei võtnud koostootmine eriti vedu. [6]

Elektritootmise tsentraliseerimine on peamine põhjus, mis koostootmise arendust takistab. Kui omavalitsus omab elektrienergia tootmisüksust, siis ainuüksi majanduslikult on see eelistatuim lahendus töötada välja asula või linna kaugkütte süsteem ja hakata soojust ära kasutama kütteks. Kui aga elektritootmise üksust omab tsentraliseeritud ja tihtipeale ka riiklik ettevõtte, siis väikeste elektrijaamade kaugküttevõrkudega integreerimine üle riigi territooriumi võib olla takistavaks faktoriks efektiivse riikliku elektrisüsteemi arengus, mis tavaliselt baseerub suurte soojuselektrijaamad. [6]

Elektrienergia tööstus pole ainuke takistav faktor. Oluline on ka kohalik kliima ja kultuur. Sel ajal kui Ühendkuningriigid ei tulnud toime koostootmisesse investeerimisega, siis Soome aga investeeris tugevalt. Üle 90% elamutest suuremates linnades on ühendatud kaugküttega ja üle 25% terve riigi elektrienergia on toodetud koostootmisjaamade poolt mis on ühendatud kaugküttega. [6]

Kaugküte oli ja jääb põhiliseks osaks koostootmises toodetud soojuse kasutamisel. 1950-ndate algusaastatel levis aga idee, et koostootmist saab ära kasutada ka tootmistehastes. Kui tehas kasutab suures mahus nii elektrit kui ka soojust, siis oma elektrijaamaga saab kasutada odavat ja lokaalselt toodetud elektrit kui ka jääsoojust tootmises; see annab majandusliku eelise tavapärase tootmise ees. Tselluloosi-, vineeri- kui ka keemiatehased on kohad, kus koostootmine on tavaliselt eelistatud lahendus. [6]

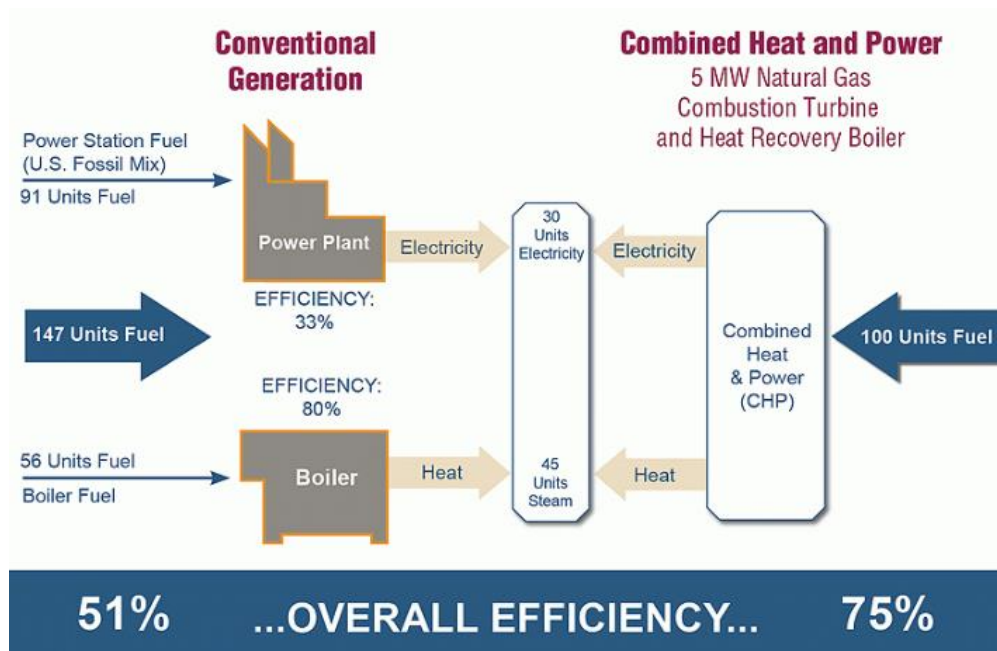
Tehnoloogilised arengud 1980-ndatel ja 1990-ndatel aastatel tegid võimalikuks koostootmise ära kasutamise nii väiksemates tööstustes, kontorites kui ka elamudes. Paljudel juhtudel oli see abiks elektritootmise deregulatsioonile, mis tähendas seaduse muutust, et väiketootjad saaksid müüa ülejäävat elektrit otse võrku. 1990-ndate keskel muutus selline hajaenergia idee populaarsemaks ja see soosis ka koostootmisjaamade ehitamist. [6]

Tänapäeval, mil turul on tihe konkurents, suurenevad tootmiskulud, edastamispiirangud ja keskkonnamõjude piirangud, on paljud tööstused on uuesti kaalumas koostootmislahendusi. Selle tulemusena tekib firmadele uus kasumiallikas elektrimüügi pealt võrku või teisele firmale. Üldise kasuteguri tõus 30 protsendilt 70 või 80 protsendini tähendab rohkem kui poole vähemaid

emissioone. Sellepärast nähakse koostootmise potentsiaali 21. sajandil vähendamaks inimtekkelisi keskkonnamõjusid. Vaatamata sellele toimub koostootmisjaamade arendus ka tänapäeval üsna aeglase tempoga. [6], [16]

2.2 Koostootmisjaama tööpõhimõte

Koostootmine ei ole tegelikult eraldiseisev tehnoloogia, vaid jääsoojuse kasulik ära kasutamise meetod. Koostootmisjaamas kasutatakse ära soojust, mis läheks muidu kaduma, võrreldes soojuselektrijaamaga. Seega on koostootmisjaama üldine kasutegur palju kõrgem. [15], [18]



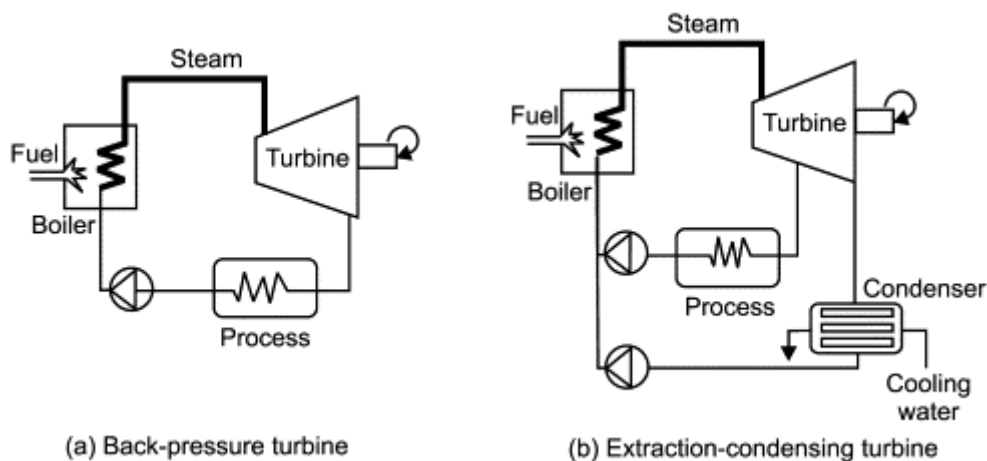
Joonis 11. Koostootmisjaama efektiivsus võrreldes soojuste ja elektri eraldi tootmisega. [20]

Joonisel 11 on näide tüüpilisest koostootmisjaamast. Selleks, et toota 75 ühikut elektrienergiat ja kasulikku soojusenergiat, kasutab tavaline süsteem 147 ühikut kütust, millest 91 ühikut läheb elektri tootmiseks ja 56 soojuste. See tähendab, et üldine kasutegur sellisel süsteemil on 51%. Kuid koostootmissüsteem, mis toodab sama hulka elektri- ja soojusenergiat, vajab ainult 100 ühikut kütust. Koostootmisjaama kasutegur sellisel juhul on 75%. Üldiselt on elektriline kasutegur

koostootmisjaamal soojust tootes madalam, võrreldes soojuselektrijaamaga, mis kasutab sama kütust. [19], [20]

Koostootmisjaama annab võrrelda ka elektrilise soojuspumbaga. Kui jaam toodab nii elektrit kui ka soojust, siis saab välja tuua elektrilise energiakao ja soojuse tootlikkuse suhte (Z faktor). Tüüpiliselt kasutab soojuspump 1 ühiku elektrilist energiat ja saab sellest 3 ühikut soojuslikku energiat ehk soojustegur (COP) on 3. Koostootmisjaam on näiliselt aurutsükliga soojuspump. Teoreetilistest uuringutest on välja tulnud, et kui anda madalaima võimaliku temperatuuriga soojust kaugkütte võrku ja kasutusel on mitme astmeline vaheltvõtuga turbiin, siis on võimalik Z faktor kuni 18, mis on sama mis COP faktor 18. Tavaliselt jääb koostootmisjaama Z faktor aga 8-10 vahele. [15]

Põhiline erinevus koostootmisjaama ja soojuselektrijaama vahel on turbiin. Kasutatavaid auruturbiine on kaks – vasturõhuturbiin ja reguleeritava vaheltvõtuga turbiin. Kasutades vaheltvõtuga turbiini tuleb arvestada, et mida kõrgem on soojusvõrku edastatava vee temperatuur, seda kõrgem peab olema turbiini vasturõhk ning seda väiksem on elektritoodang. Vaheltvõtuga turbiini elektriline koormus ei sõltu välisest soojuskoormusest, sest osa auru eemaldatakse enne lõpprõhuni paisumist. [21]



Joonis 9. Vasturõhu ja vaheltvõtuga turbiini töö skeemid. [22]

Vasturõhuturbiinist väljub aur rõhul, mis on võrdne soojustarbija poolt vajatava rõhuga (vasturõhk). Soojusvõrgu enda temperatuur sõltub aga välisõhu temperatuurist ja aastaajast. [23]

Vasturõhuturbiinil puudub madalrõhu osa, kust edasi läheks aur kondensaatorisse, vaid selle asemel antakse soojus tarbijatele. See tähendab, et antud turbiin ei ole paindlik elektritootmises,

sest soojustarbija energiavajadus määrab üheselt ära turbiini läbiva aurukoguse ehk turbiini võimsuse. [23]

Mida suurem on vajatav soojusvõrku antava vee temperatuur, seda kõrgem peab olema ka turbiini vasturõhk, mis tähendab omakorda väiksemat elektrienergia tootmist soojusenergia arvelt. [23]

Vaheltvõtuga auruturbiinis eemaldatakse osa auru enne lõpprõhule paisumist, saadud auru kasutatakse kas kütteks või tehnoloogilisteks vajadusteks. Selle eelis vasturõhuturbiini ees on selle elektrilise energia tootmise sõltumatus välisest soojuskoormusest. [23]

Aurukogus on sellises turbiinis üldiselt reguleeritav, mis tähendab, et kui pole soojusnõudlust, töötab turbiin kondensatsioonrežiimis, kuid väiksema kasuteguriga kui klassikaline kondensatsioon turbiin. [23]

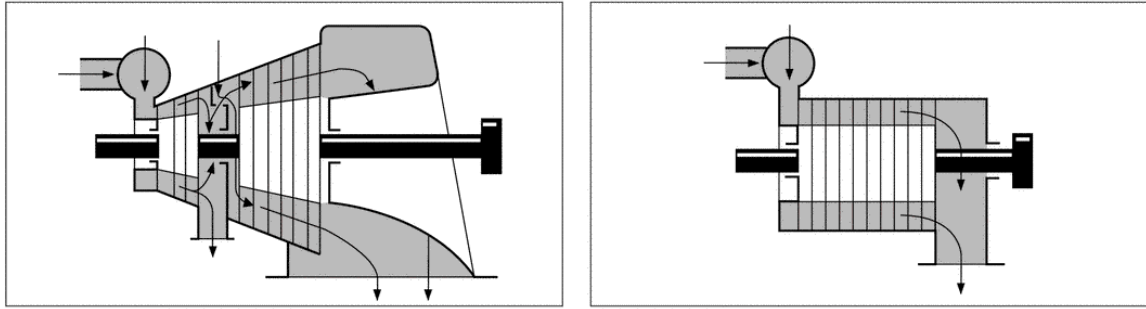
2.3 Koostootmisjaamade liigid

Koostootmisjaama kasutegur sõltub ka sellest, kuidas süsteem on üles ehitatud ning mis tehnoloogiaid kasutatakse: [20], [23]

- Auruturbiin – 80%
- Sisepõlemismootor – 89 - 92%
- Gaasiturbiin – 70 - 90%
- Mikroturbiin – 70 - 86%
- Kütuseelement – 55 - 80%

2.3.1 Auruturbiiniga koostootmisjaam

Auruturbiinid koostootmisjaamas jagunevad kaheks – vasturõhu- ja vaheltvõtuga auruturbiin.



Joonis 12. Reguleeritava vaheltvõtuga auruturbiin (vasakul) ja otsevooluga vasturõhuturbiin (paremal). [24]

Vasturõhuga auruturbiin ehk mitte kondenseeruv auruturbiin. Turbiinist väljuva auru rõhk on võrdne või suurem kui atmosfäärirõhk. Väljuvat auru kasutatakse ära kütteks, kuuma vee tootmiseks või muudeks tööstuslikeks protsessideks. Vasturõhuturbiin võib olla nii üheastmeline kui ka mitmeastmelise disainiga. Selle turbiini peamine mõte ei ole elektritootmine, vaid soojuse ära kasutamine muudeks protsessideks. [24]

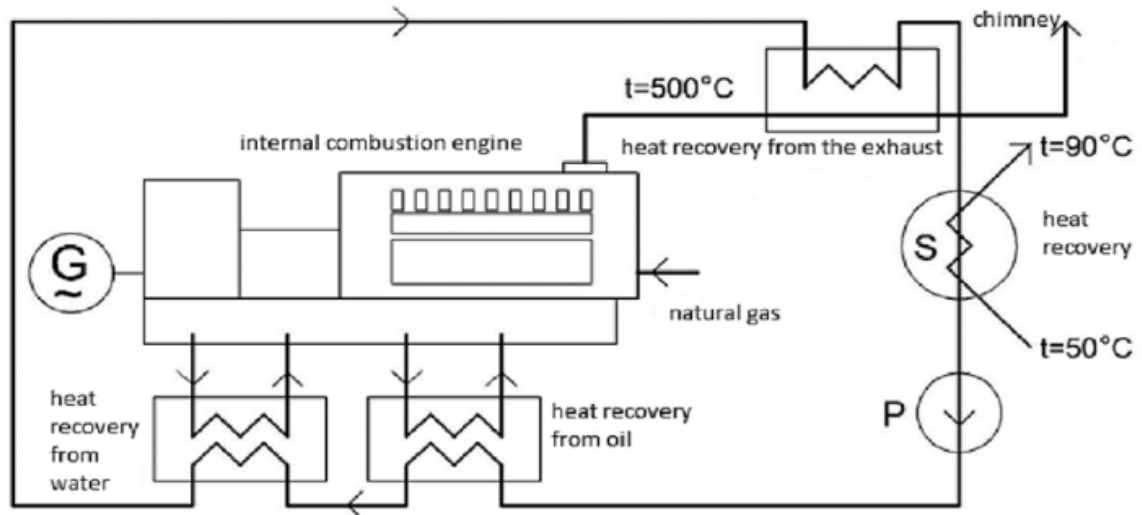
Vaheltvõtuga auruturbiin on mitmeastmeline aurujõuseade, mis võimaldab auru eemalejuhtimist enne täielikku paisumist turbiinis. Turbiinid on disainitud ühe, kahe või kolme vaheltvõtuga, mis sõltub turbiini rakendusala. Iga vaheltvõtu astme lisamine lisab turbiinile keerukust ja hinda. Tänu sellele on ühe astmega vaheltvõtu turbiinid kõige rohkem levinud. [24]

Vaheltvõtuga turbiinid on tavaliselt rakendatud süsteemidesse, kus on tarvis erinevate rõhkudega auru või kus on muutuva nõudlusega madalarõhuline protsess. Turbiini elektriline kasutegur ei sõltu soojusnõudlusest. [24]

2.3.2 Sisepõlemismootoriga koostootmine

Sisepõlemismootoriga jõuseade töötab kas Otto või Dieseli ringprotsessil ning toodab üldiselt madalatemperatuurilist soojust. Lahkuvate gaasidega on võimalik toota ka tehnoloogilist auru. [23]

Otto mootorites kasutatakse üldjuhul kütuseks maagaasi, soojuse ja elektrilise võimsuse suhe on 1,2 – 1,7. Soojus saadakse heitgaasidest, õlijahutist ja ka ülelaadimisõhu jahutist. Lahkuvate gaaside temperatuur on 400 – 500°C ja see jahutatakse kuni 70 °C, soojusvahetis oleva soojendatava vee temperatuur tõuseb kuni 115°C. [23]



Joonis 13. Sisepõlemismootoriga koostootmis süsteem. P - pump, S - soojusvaheti, G - elektri generaator. [25]

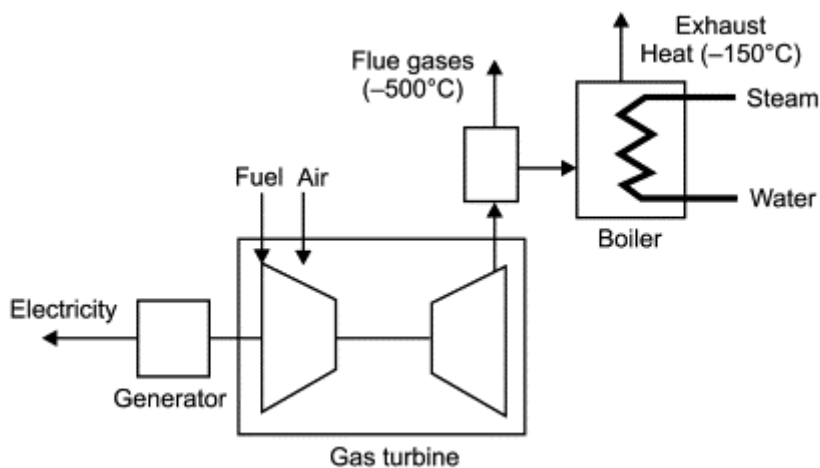
2.3.3 Gaasiturbiiniga koostootmine

Gaasiturbiiniseade töötab Braytoni ringprotsessil. Gaasiturbiin on teiste soojusmootoritega võrreldes suhteliselt uus seade, mis võeti kasutusele umbes 50 aastat tagasi. [23]

Gaasiturbiini kasutegurit saab suurendada sisenevate gaaside temperatuuri tõstmisega. Kui turbiini labadel puudub jahutus, võib gaaside temperatuur olla 850 – 900°C ja labade jahutamisel isegi 1400°C. [23]

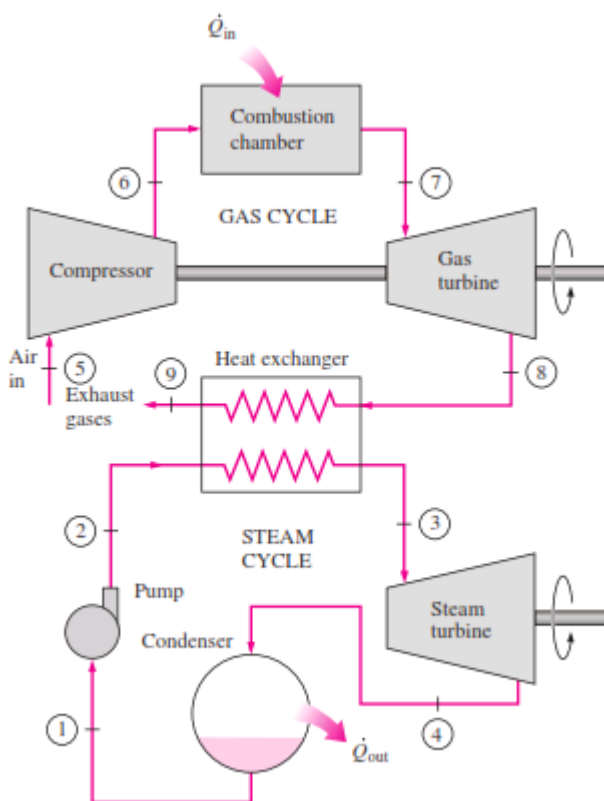
Gaasiturbiini pihustatakse ka vett või veeauru, et saada kätte täiendavat võimsust. See saavutatakse turbiini läbiva massikulu suurendamisega ja kuna see alandab leegi temperatuuri, siis on see ka hea heitgaasides sisalduva NO_x gaaside vähendamiseks. [23]

Soojust saadakse gaasiturbiinist väljuvate gaaside jahutamisega tavaliselt utilisaatorkatla abil. Toodetud soojuse ja elektri võimsuse suhe on piirides 2,0 – 3,5. [23]

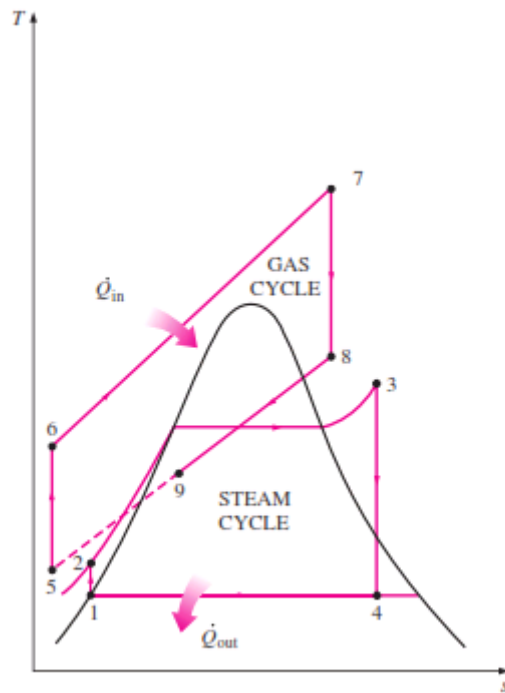


Joonis 14. Gaasiturbiini tööpõhimõtte skeem. [26]

Kombineeritud gaasi- ja auruturbiiniga süsteemi korral suunatakse gaasiturbiinist lahkuvad gaasid utilisaatorkatlasse, kus toodetakse auru ja see omakorda liigub edasi auruturbiini. Kahe termodünaamilise ringprotsessi, Braytoni ja Rankine'i, kooskasutamise elektriline kasutegur on 60%, kuid see ilmneb alles suurematel võimsustel, vahemikus 75 – 400MW. Selline kombineeritud tsükkel on äärmiselt paindlik, mis võimaldab töötamise ka ilma utilisaatorkatlata, kui pole tarvis niivõrd palju elektrilist võimsust. Sel puhul juhitakse gaasiturbiinist väljuvad gaasid otse korstnasse. [23]



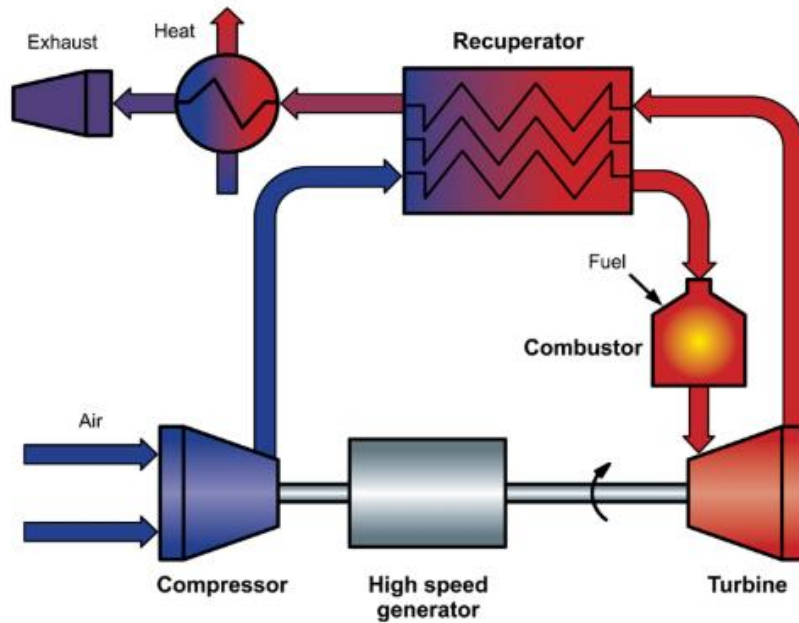
Joonis 15. Gaasiturbiini ja utilisaatorkatla süsteemi tööpõhimõte. [27]



Joonis 16. Kombineeritud tsükli tööpõhimõtte Ts diagramm. [27]

2.3.4 Mikroturbiinid koostootmises

Mikroturbiinide elektrilised võimsused jäävad alla 50kW. Soojus saadakse gaasiturbiinist väljunud gaasidest. Soojuse ja elektri energia suhe jääb vahemikku 2,0 – 3,5. Selle eripäraks on madalad hoolduskulud. [23]

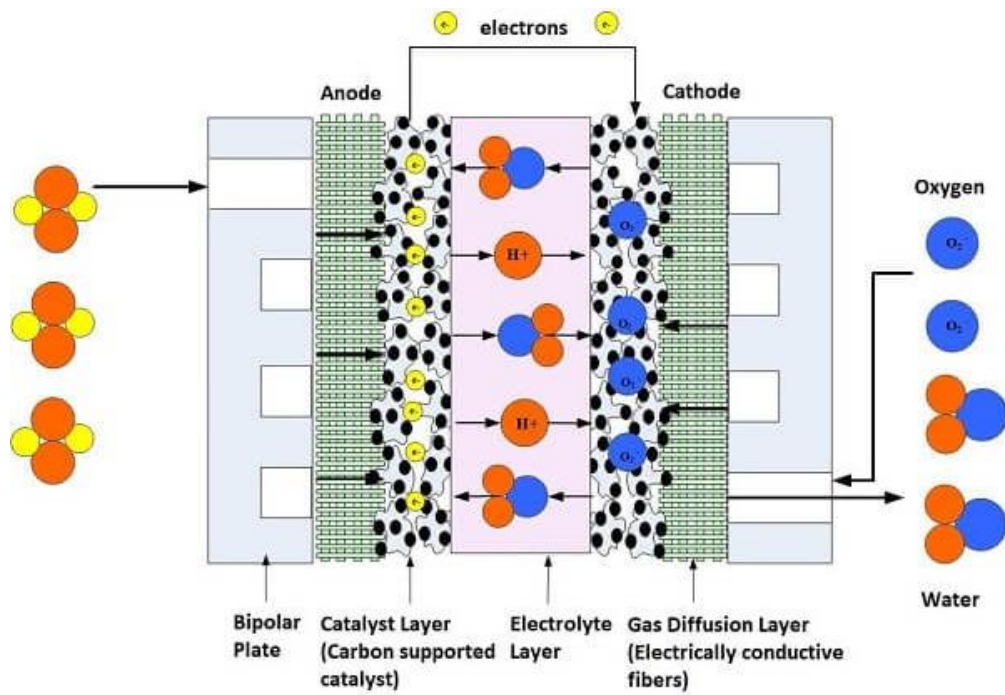


Joonis 17. Mikroturbiini tööpõhimõtte skeem. [28]

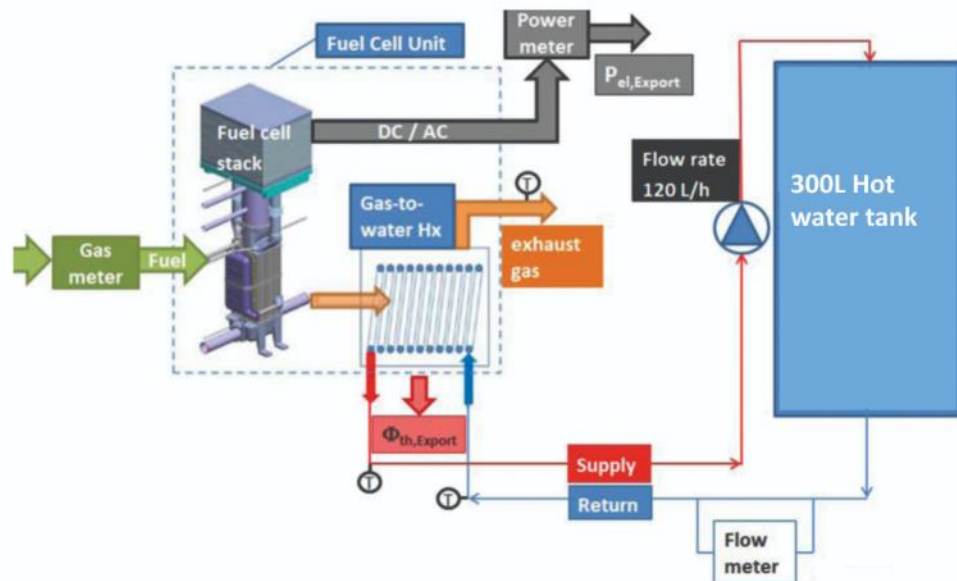
2.3.5 Kütuseelemendiga koostootmisjaam

Kütuseelemendis toimub elektrokeemiline oksüdatsioon ehk teisisõnu külm põlemine, mille käigus on saadusteks elekter ja soojus. Element sisaldab katalüsaatoreid, mille vahel on poorne elektrolüüt – ioonmembraan. Anoodile juhitakse vesinik ning katoodile hapnik. [23]

Põlemisreaktsioonis peab tavaliselt kütus ja oksüdeerija füüsiliselt kokku puutuma, et saaks toimuda elektronide ülekande. Kütuseelementides on aga kütus ja oksüdeerija üksteisest eraldatud. Vesinikku ja hapnikku eraldav elektrolüüt lubab kas vesiniku või hapniku ioonil liikuda elektrodide vahelisse alasse. Elektronide vahetus toimub aga mööda välist elektriringi ning see tekitab alalisvoolu. [23]

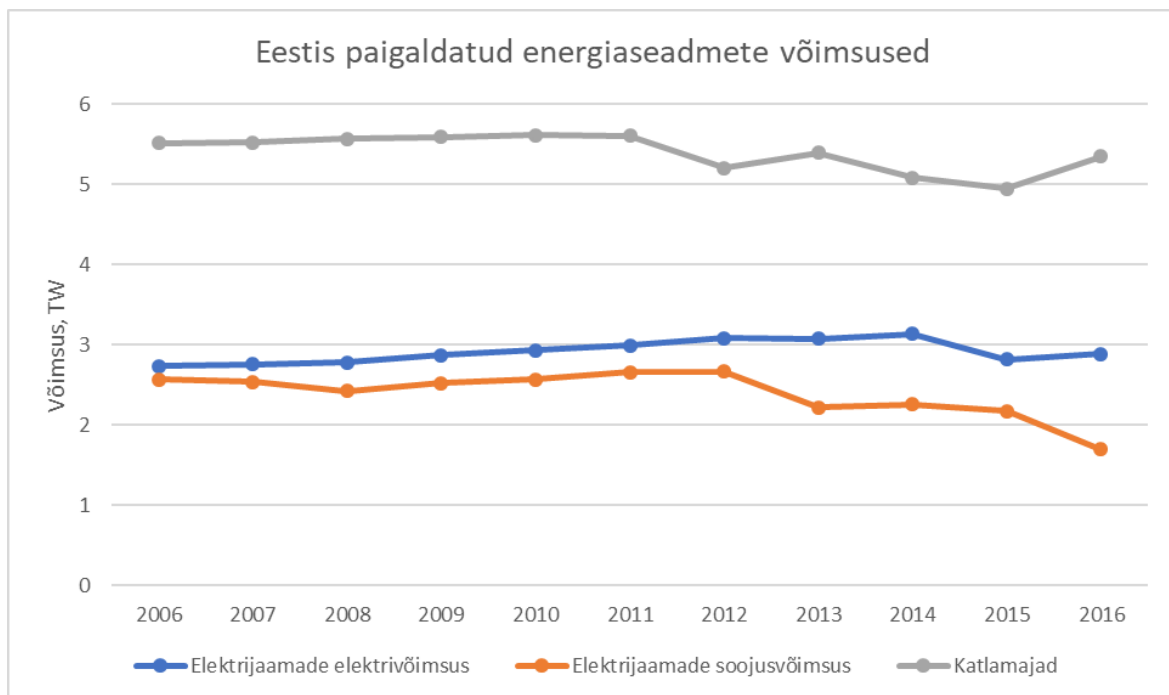


Joonis 18. Kütuseelemendi tööpõhimõte. [29]



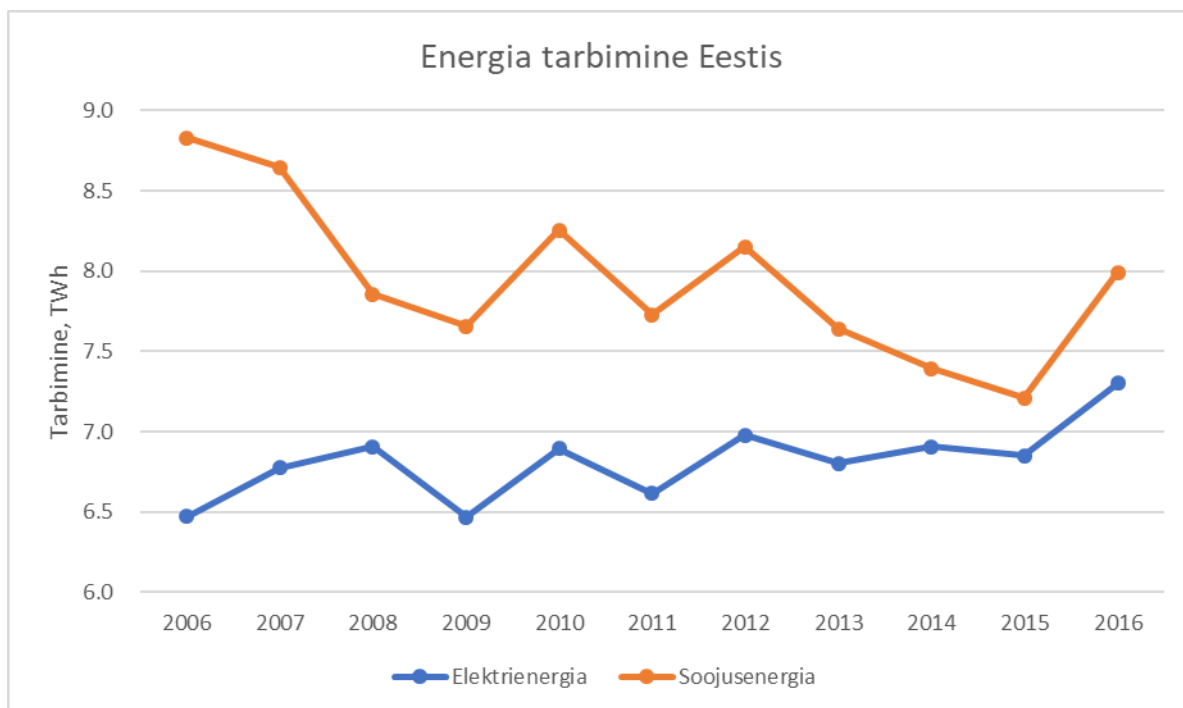
Joonis 19. Kütuseelemendi tööpõhimõte koostootmis süsteemis. [30]

3. ELEKTRI- JA SOOJUSENERGIA TOOTMINE EESTIS



Graafik 1. Eestis paigaldatud energiaseadmete võimsused. [31]

Graafikus 1 on näha, et põhiline osa Eestis olevatest seadmetest on pühendatud soojusenergia tootmiseks. Tabelis esitatud andmed sisaldavad ka vastavaid kadusid.



Graafik 2. Energia tarbimine Eestis. [31]

Põhiline Eestis tarbitavast energiast on soojusenergia. Graafikult 2 on näha ka soojusenergia langevat trendi, mis viitab hoonete ja kaugküttevõrgustiku renoveerimist ja efektiivemaks tegemist. Esitatud andmed esindavad tarbimist ilma kadudeta.

Tabel 1. Katelde arv kütuse järgi Eestis. [32] *sisaldab vedelgaasil töötavaid katlaid; **sisaldab teravilja, põhu ja rapsijäätmete tarbimist katledes.

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Põlevkivil töötavad katlad	0	2	0	0	0	2	3
Turbal töötavad katlad	21	22	19	19	18	17	20
Puidul töötavad katlad	114	125	147	149	143	151	180
Raskel kütteõlil töötavad katlad	2	0	0	0	0	0	4
Põlevkiviõlil töötavad katlad	332	263	260	163	147	157	140
Kergel kütteõlil töötavad katlad	82	64	53	45	33	28	66
Maagaasil töötavad katlad*	462	370	449	388	385	378	356
Elektrienergiat töötavad katlad	6	6	5	6	6	7	6
Põlevkivi- ja biogaasil töötavad katlad	0	0	0	0	0	0	3
Rohtsel biomassil töötavad katlad**	1	1	1	3	3	2	0

Tabelis 1 on näidatud palju on Eestis erinevatel kütustel töötavaid katlaid.

3.1 Elektritootmine Eestis

Üle 90% Eestis toodetud elektrist tuleb Narva lähedal asuvatest soojuselektrijaamadest – Eesti, Balti ja Auvere elektrijaam. Kõik nimetatud elektrijaamad kuuluvad Eesti Energiale, mis ekspordivad elektrienergiat Baltimaadesse ning merekaabli abil ka Põhjamaadesse. Balti elektrijaam toodab ka soojust Narva linnale. Nende kolme maksimaalne tootmisvõimekus on 12 TWh aastas. Eestis tarbitakse keskmiselt 8 TWh elektrienergiat aastas, ühe inimese kohta umbes 1200 kWh elektrit. [32]

2018 aprilli seisuga on tippkoormuse ajal on Eestis kasutatav tootmisvõimsus 1848 MW. Mikrotootjad ja väiketootjad (vähem kui 15 kW võimsusega) on Eestis: [33]

- Elektri tuulikud – 222,7 kW
- Päikesepaneelid – 8248,1 kW
- Hüdroelektrijaamad 29,5 kW.



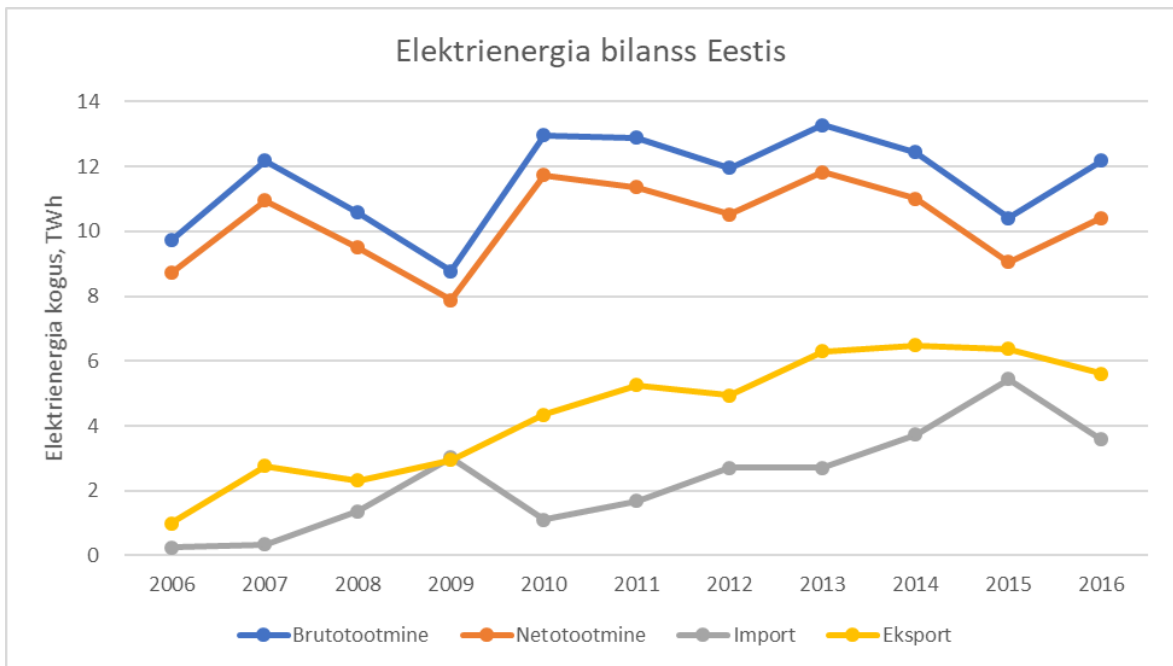
Pilt 1. Eesti Elektriijaam, sügis 2015. Pildi autor: Andres Meesak



Pilt 2. Balti Soojuselektriijaam sügisel 2015. Pildi autor: Andres Meesak



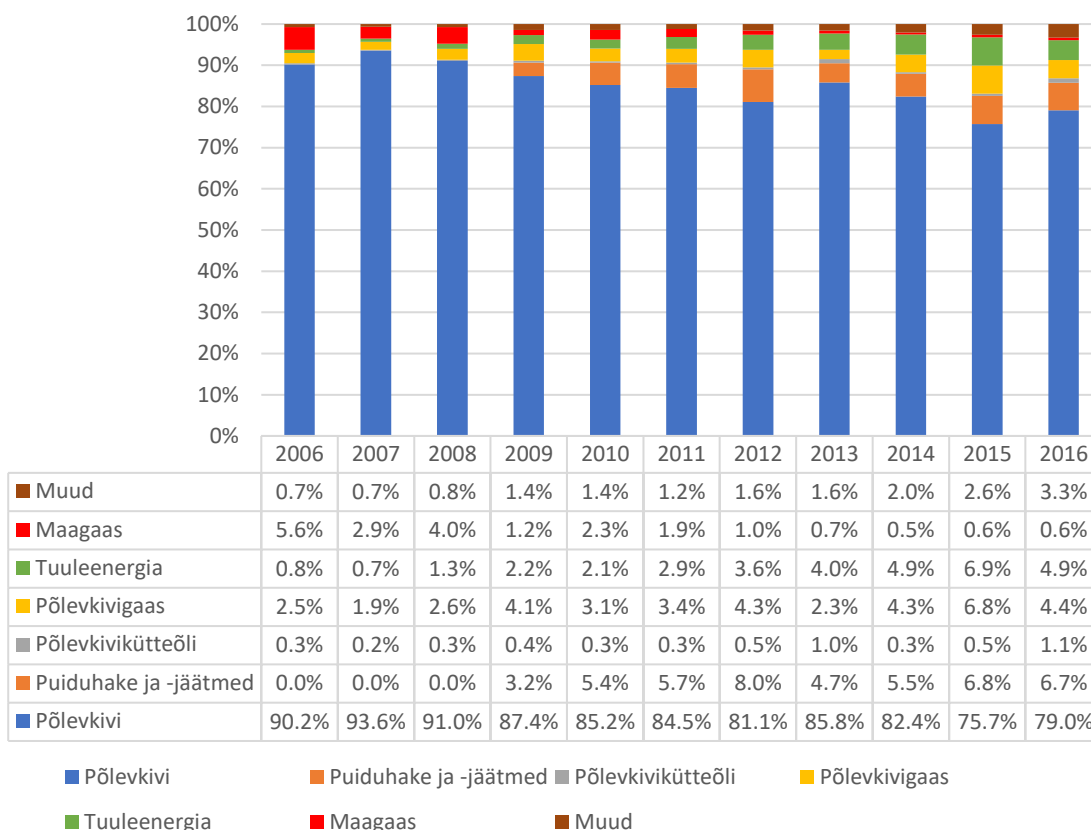
Pilt 3. Auvere elektrijaam. Pildi autor: Eesti Energia



Graafik 3. Elektrienergia bilanss Eestis. [31]

Eesti toodab pea kõik vajamineva elektrienergia kodumaiselt. Toodetav elektrienergia ülejääk suunatakse ekspordiks. Graafikult 3 on nähtav import ja eksport sisaldab elektrienergia tarnet näiteks Soomest Lätti. Kui seda arvesse võtta, siis oma elektrit Eesti ekspordib ja import on nullilähedane.

Eesti elektrienergia tootmise energiaallikad



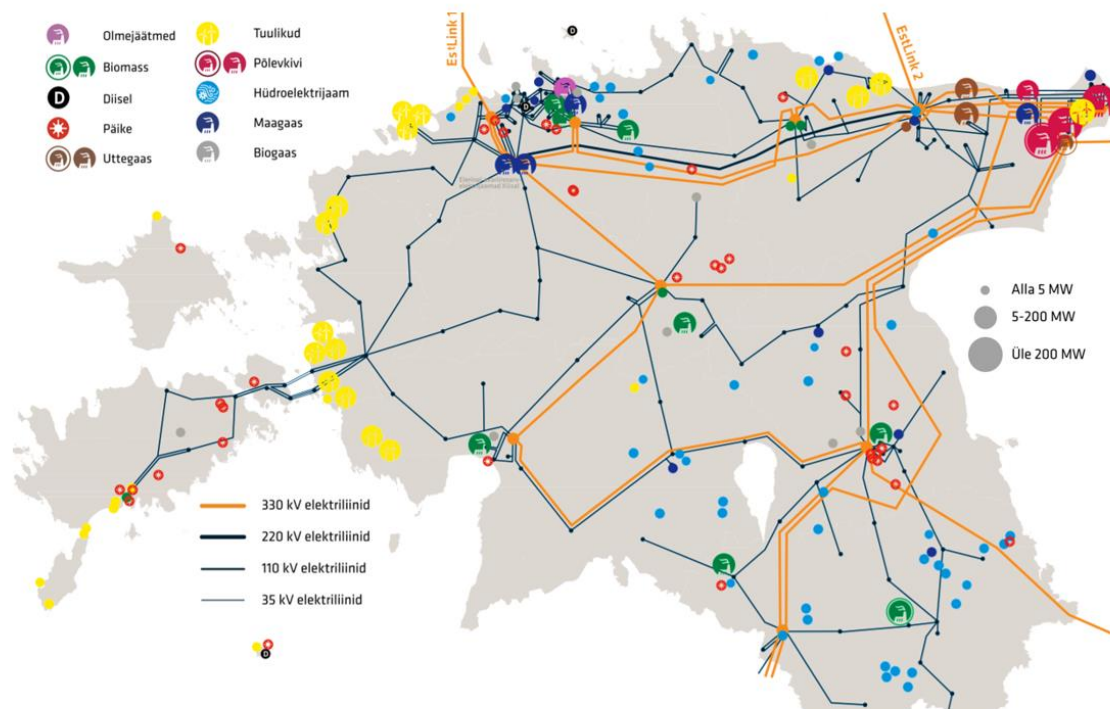
Graafik 4. Eesti elektrienergia tootmise energiaallikad. [31]

Graafikult 4 on näha, kodumaine elektrienergia on toodetud põhiliselt põlevkivist. Nähtav on ka maagaasi osakaalu vähenemine kümne aasta jooksul, ning tuuleenergia ja puiduhake osakaalu suurenemist. Põlevkivil on samuti langev tendents.

Maagaasi kasutab peamiselt Iru koostootmisjaam, kus on paigaldatud üks vasturõhu ja üks vaheltvõtuga kondensatsiooniturbiin. [33]

Puidu osakaal on hüppeliselt tõusnud aastast 2009, kui avati Tallinna lähedal koostootmisjaam mis oli esimene hakkepuidul töötav koostootmisjaam. [33]

2017. aastal oli traditsiooniliselt domineeriv energiaallikas põlevkivi, mille osakaal oli 79%. Põlevkivigaasi osakaal oli 5,5%, puiduhake ja -jäätmel 7%, ning maagaasi ja raskekütteeõli osakaal vastavalt 0,6% ja 0,9%.



Joonis 10. Elektritootmisasukohtade asukohtade kaart Eestis. [33]

Pildil 10 on näha kuidas on ära jaotunud elektritootmine Eestis. Näha on, et suuremad elektritootmisjaamad asuvad Narva lähedal ja kasutavad kütuseks põlevkivi, mida kaevandatakse seal lähedal asuvatest kaevandustest.

3.2 Koostootmine Eestis

2013. aastal alustas tööd Iru Elektriijaama prügpõletusplokk Tallinna lähedal. Ploki elektriline võimsus on 17 MW ja soojuslik 59 MW ja põletab umbes 200 tuhat tonni olmejäätmeid aastas. Pääskülas asub ka AS Tertsil prügilagaasil töötav koostootmisjaam, mis toodab 0,84 MW elektrilist ja 1 MW soojuslikku energiat. [23]

Narva Soojusvõrk on ettevõtte, mis haldab kaugkütte võrku Narva linnas ning kasutab ära Balti elektriijaamas toodetud soojusenergiat. Ettevõtte varustab soojusega ligi 60 000 elanikku, tarbimise koguvõimsus on ligi 333 MW. [34]

Kopli asub gaasmootoritel põhinev koostootmine, mille võimsus on 2,4 MW_s ja 0,878 MW_e. Toodetus soojust kasutatakse BLRT Grupi Kopli poolsaare tootmiskompleksi kütteks ja elekter suunatakse võrku. [23]

2012. aastal koostöös Valka linnavalitsusega rajati biokütusel töötav koostootmisjaam, mille võimsuseks on 2 MW_e ja 8 MW_s. Kütuseks kasutatakse seal hakkpuitu, saepuru ja turvast. [23]

Paide linna soojus tuleb koostootmisjaamast, mis ehitati aastal 2012 Eesti energia ja OÜ Pogi koostööl. Selle võimsus on 2 MW_e ja 8MW_s. [23]

Weroli tehase territooriumile on rajatud kolmikjaam, mis toodab elektrit, soojust, ja jahutust – 4,3 MW, 1,7 MW ja 2,5 MW võimsustega. [23]

Kuressaares asuv biokütusel töötav koostootmisjaam valmis aastal 2012 ja toodab 2,3 MW elektrit. [23]

2016. aastal valmis Imavere koostootmisjaam elektrilise võimsusega 6,5 MW. [23]

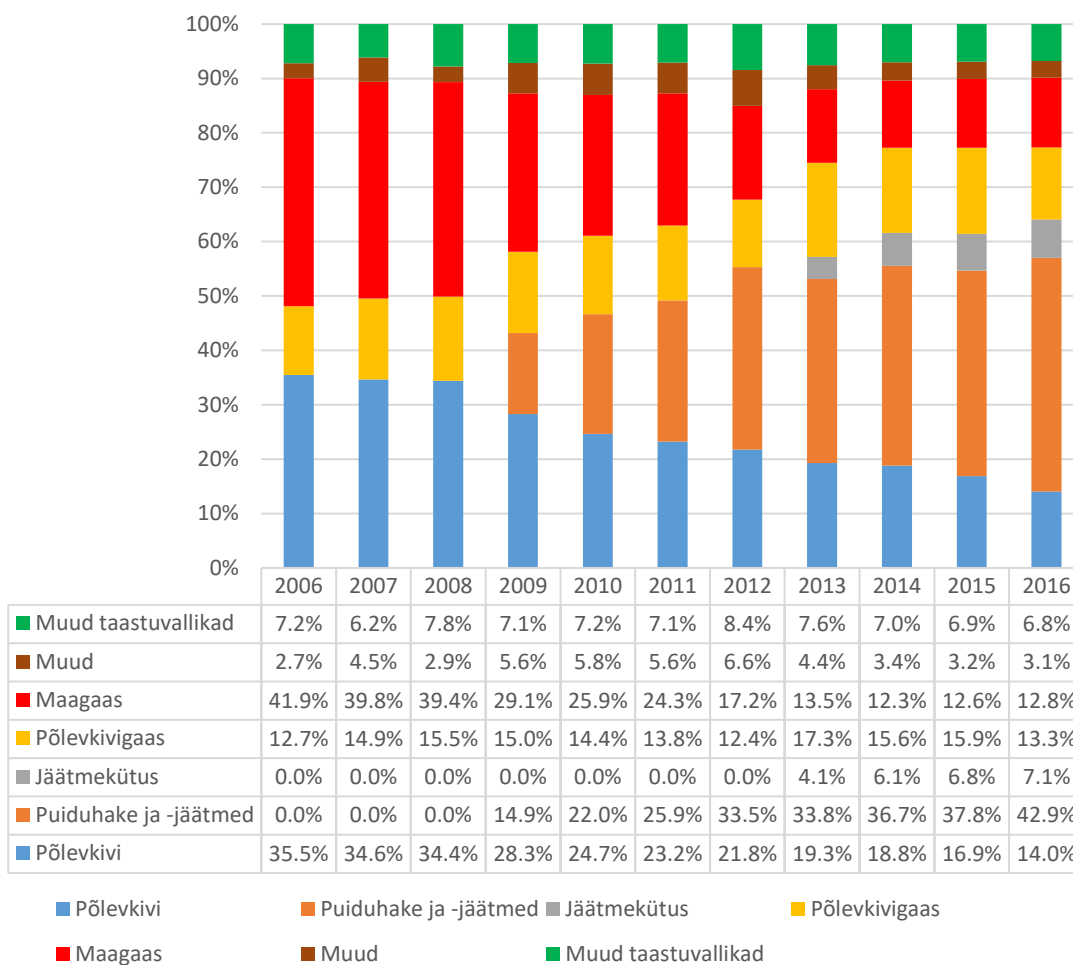
Nii Tallinnas, Tartus kui ka Pärnus töötavad koostootmisjaamad on ca 22 MW elektrilise võimsusega ja soojusvõimsus nendes jaamades on ca 50 MW. Tallinna jaamal olev skraber võimaldab veeauru kondenseerumisega heitgaasidest kätte saada lisaks 18 MW soojuslikku energiat. [23]

Tabel 2. Soojusenergia tootmine ja tarbimine Eestis. [32] * V.a elektrijaamade omatarve enektrienergia tootmiseks; ** Tarbijatele müüdüd soojus (toodangu üldkogusest); *** K.a mäetööstus jaenergeetika; **** Kadu soojusvõrgus.

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Tootmine	9 795	9 134	9 580	9 006	8 913	8 608	9 541
..tootmine elektrijaamades*	4 022	3 497	3 752	4 033	4 077	3 998	4 223
..tootmine katlamajades	5 772	5 637	5 828	4 973	4 836	4 610	5 318
Kaugküte**	7 097	6 357	6 798	6 396	6 059	5 890	6 650
Tarbimine	8 752	8 168	8 598	8 098	8 015	7 789	8 640
..tarbimine tööstuses***	2 577	2 414	2 589	2 396	2 581	2 516	2 835
..tarbimine ehituses	47	36	37	33	32	33	37
..tarbimine põllumajanduses	124	113	114	112	108	100	105
..tarbimine kodumajapidamises	4 159	3 869	3 953	3 839	3 470	3 297	3 627
..tarbimine muudes harudes	1 845	1 736	1 905	1 718	1 824	1 843	2 036
Kadu****	1 042	966	982	908	898	819	901

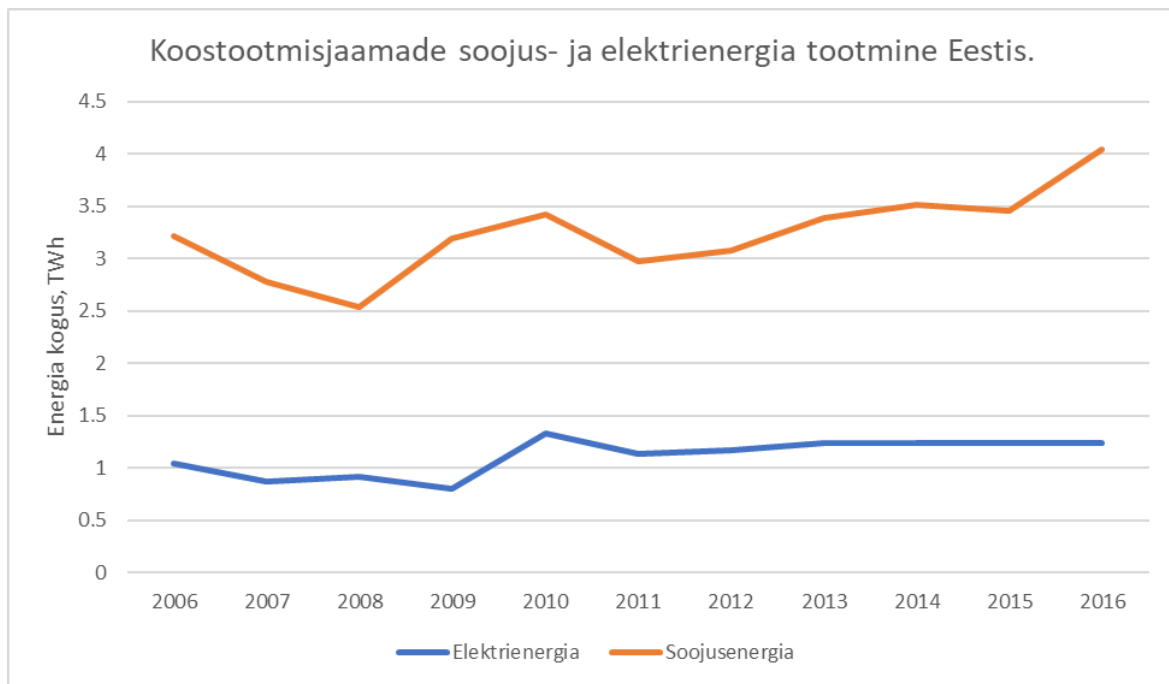
Tabelis 2 on näha, soojuse tootmist Eestis lähiajaloo. Märgata on kaugküte soojuse tarbimise langust, ehk kadude langust, mis viitab aga kaugküte võrkude renoveerimisele ja hoonete soojustamisele, ning uute ja energiasäästlike hoonete ehitamist. 2016. aastal pärines lausa 80% kogu Eestis toodetavast soojusest koostootmisjaamadest. [33]

Eesti soojusenergia tootmise energiaallikad



Graafik 5. Eesti soojusenergia tootmise energiaallikad. [31]

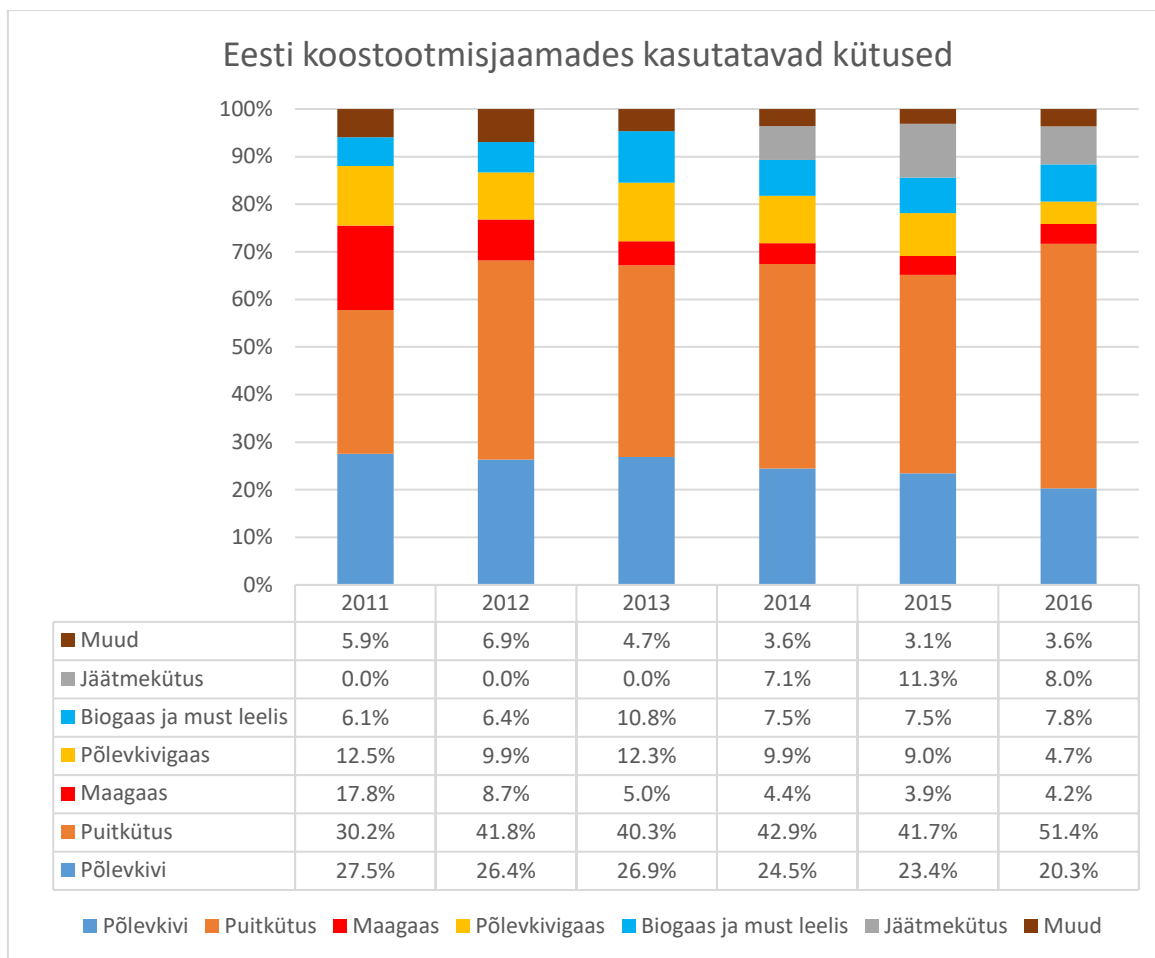
Graafilul 5 on näha, et maagaas oli soojusenergia tootmisel domineeriv aastal 2006, aga see on aastatega märkimisväärselt vähenenud ning drastiliselt suurenenud on puiduhakke osakaal. Põlevkivi kasutamine soojusenergia tootmiseks on 10 aasta jooksul ligi 2 korda vähenenud. [31]



Graafik 6. Koostootmisjaamade soojus- ja elektrienergia tootmine Eestis. [31]

2016. aasta seisuga on Eestis töötavaid koostootmisjaamu 51. Sealhulgas suhteliselt võrdselt on kasutatud tehnoloogiaid – vasturõhuturbiini kasutavad jaamu 14, vaheltvõtuga turbiine 19, ja sise põlemismootoreid 18. [31]

Aastal 2016 toodeti umbes 80% Eestis toodetavast soojusest koostootmisjaamades. [33]



Graafik 7. Eesti koostootmisjaamades kasutatavad kütused. [31]

Üldiselt on osakaal jäänud aastatega samaks, väljaarvatud maagaasi kasutuse vähenemine ja jäätmekütuse rakenduse kasv. Põlevkivi, nagu ka elektri tootmisel, on langeva trendiga ja puiduhakke osakaal suureneb.

Statistikaameti kodulehel kahjuks polnud enne aastat 2011 andmed täielikud, seega ei olnud võimalik saada koguülevaadet kümnest aastast siinkohal.

Puitkütuse kasv aastast 2013 tuleneb Keskkonnainvesteeringute Keskuse poolt antava struktuuritoetuse pärast, mis soodustab biokütuste ära kasutamist energeetikas. [33]

Maagaasi kasutamine jääb ainult tipukoormuste katmiseks, mis tähendab, et see asendatakse kohalike kütustega, seda on näha graafikul 8 Tallinna soojusenergia tootmise näitel. Tänu sellele jääb Eestisse 50 miljonit eurot rohkem aastas ja atmosfääri paisatav CO₂ kogus väheneb 200 tuhande tonni võrra. [35]

Tabel 3. Biokütusel töötavad koostootmisjaamad Eestis. [36]

Ettevõtte nimi	Jaama nimi	Omandivorm	Asukoht	Katelde arv	Neto projekt-võimsus (MW)*	Kasutatavad kütused	Tootmise algus
Tallinna Elektri-jaam OÜ	Tallinna Elektri-jaam	eraomand	Tallinn	1	92	hakkepuit, turvas	2009 I poolaasta
Anne Soojus AS	Tartu Elektri-jaam	eraomand	Luunja vald, Tartumaa	1	90	hakkepuit, turvas	2009 I poolaasta
Fortum Eesti AS	Pärnu Elektri-jaam	eraomand	Pärnu	1	84	hakkepuit	2011 I poolaasta
Helme Energia OÜ	Helme Energia KTJ	eraomand	Helme vald, Valgamaa	1	21,5	puidu- ja raiejäätmed	2012 detsember
Kuressaare Soojus AS	Kuressaare Soojuse KTJ	riiklik (KOV)	Kuressaare	1	17,4	hakkepuit	2013 märts
ES Bioenergia OÜ	ES Bioenergia KTJ	eraomand	Rakvere	1	11	hakkepuit	2014 I poolaasta
Pogi OÜ	Pogi KTJ	eraomand	Paide	1	10	hakkepuit	2015 I poolaasta
Adven Eesti AS	Rakvere Päikese tänava KTJ	eraomand	Rakvere	1	6,3	hakkepuit	2014 aprill

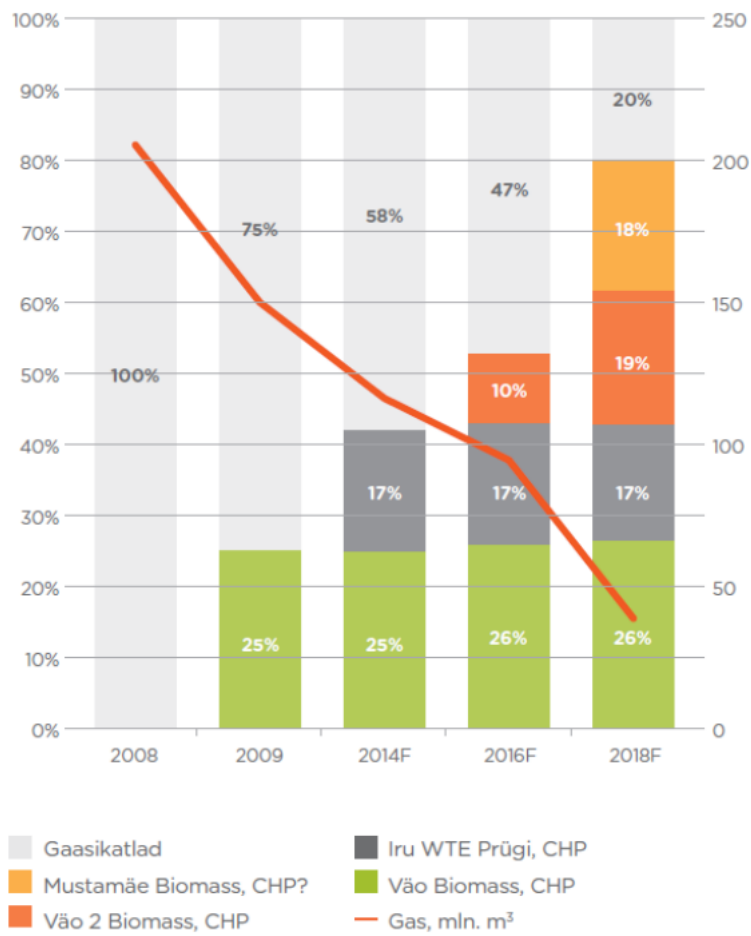
332,2

Lähiaastatel tulekul

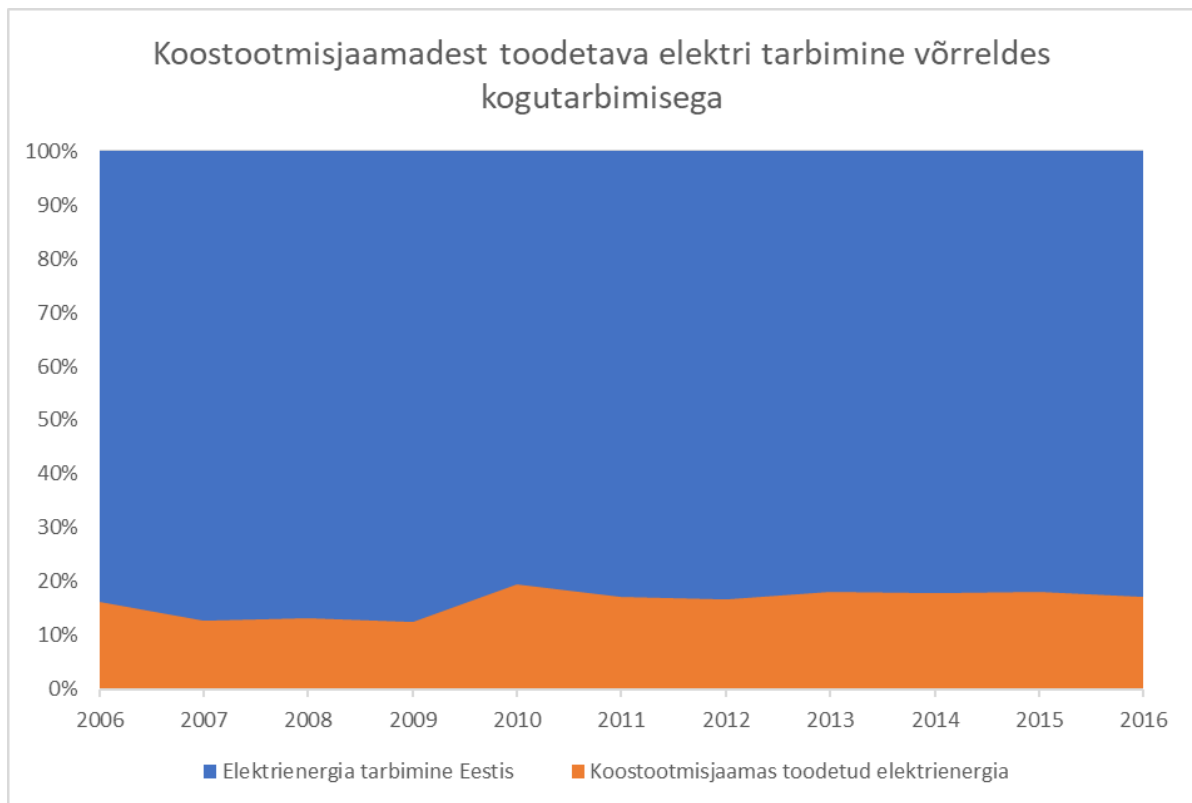
Auragen OÜ	Tallinna Elektri-jaam II	eraomand	Tallinn	1	97,9	hakkepuit, turvas	2016 sügis
Graanul Invest AS	Imavere Energia KTJ	eraomand	Imavere vald, Järvamaa	1	38	puidu- ja raiejäätmed	2016

135,9

Tabelis 3 on väljatoodud Eestis olevad biokütusel töötavad koostootmisjaamad. Nüüdseks on ka töös Tallinna Elektri-jaam II ning Imavere Energia KTJ töös.

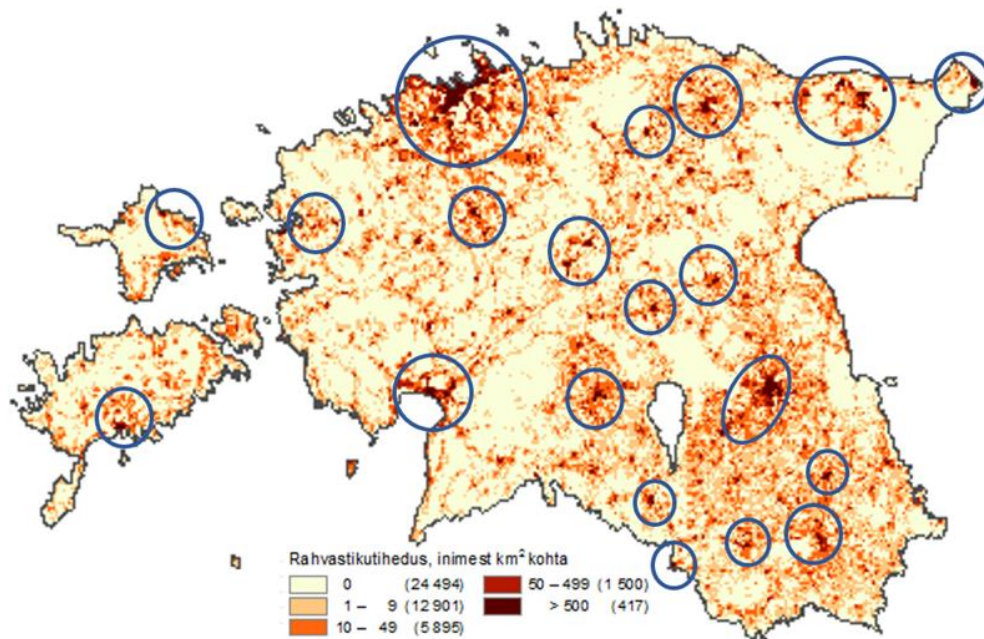


Graafik 8. Kütuste osakaal soojusenergia tootmiseks Tallinnas läbi aastate. [35]

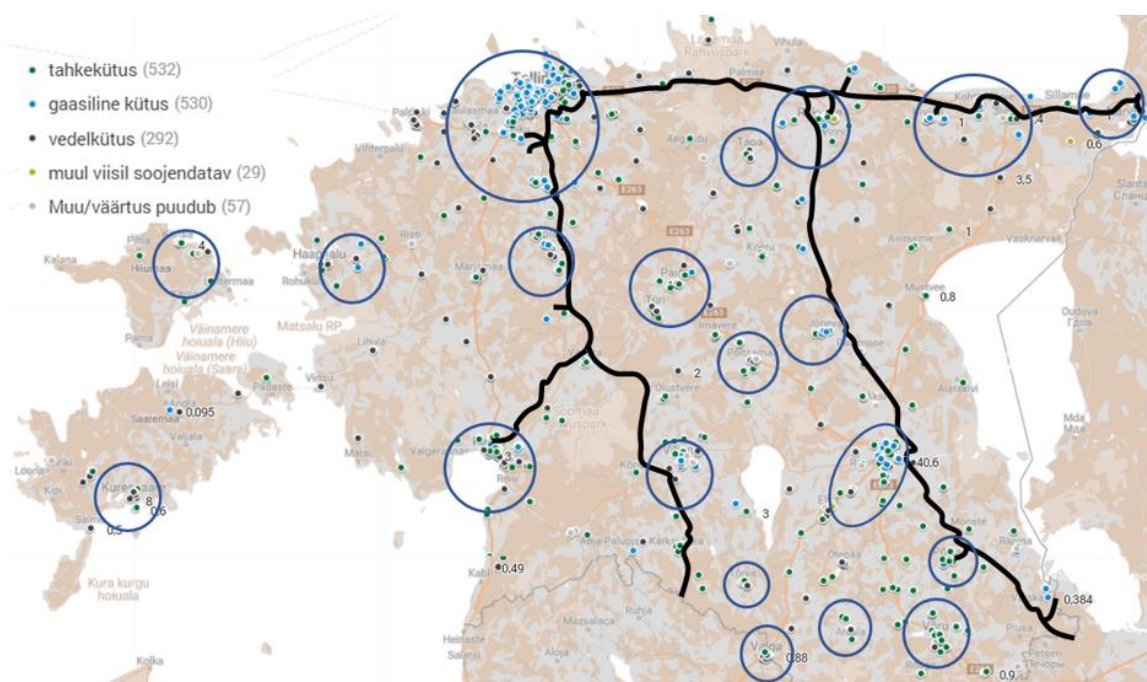


Graafik 9. Koostootmisjaamades toodetava elektri tarbimine võrreldes kogutarbimisega. [31]

Graafikul 9 on näha koostootmisjaamades toodetud elektrienergia ja kogutarbimise vahelist suhet Eestis. 10 aasta jooksul on see suhe jäänud peaaegu samaks. Kuna koostootmisjaamu on ehitatud koguaeg juurde ja suhteline elektri tarve on samal tasemel tähendab see üldise elektri tarbe tõusu Eestis.



Joonis 11. Eesti rahvastikutihedus. [33]



Joonis 12. Katelde asukohad. Must joon on maagaasi trass. [33]

Joonistelt 11 ja 12 on näha rahvastiku paiknemise ja katelde asukohtade ühtivust. Mõlemal joonisel on ringiga märgitud ära samad asukohad kus on katelde arv suurem, ning mis korreleerub suuremate asulatega. [33]

3.3 Soojuselektrijaama koostootmisjaamaga asendamise arvutused

Kondensatsioonitsükliil töötava soojuselektrijaama asendamist koostootmisüksusega võetakse vägagi positiivselt, sest teoorias on kütuse kokkuhoid suur ja ainuüksi see on piisav ettekääne tänapäevases olukorras, kus keskkonnasaaste on tõsine probleem.

Järgnevates arvutustes on kasutusel nii soojuselektrijaama kui ka koostootmisjaama põhimõttelised kasutegurid, millest saab välja tuua üldise energiasäästu.

Arvutustes on kasutusel valem:

$$Kütuse\ hulk = \frac{energia\ kogus}{kasutegur} \quad (3.1)$$

Arvutustes on aluseks äsja, 2015. aastal valminud Auvere soojuselektrijaam, mille elektriline võimsus on 300MW. Elektriline kasutegur on umbes 40%. [37], [38]

Koostootmisjaama näitena on valitud peatükis 2 väljatoodud üldine kasutegur, milleks on 75%. See on keskmise koostootmisjaama oodatav kasutegur. Elektriline kasutegur on 30% ja soojuslik 45%.

Lihtsuse mõttes on arvutuste teostamisel tehtud eeldus, et kütus mõlemas jaamas on sama kütteväärtusega.

Kasutades valemit 3.1 saab arvutada, et kui Auvere soojuselektrijaamas toota 30 ühikut elektrit peab põletama:

$$Kütuse\ hulk = \frac{30}{0,4} = 75\ ühikut$$

Seega 40% kasuteguriga soojuselektrijaam peab põletama 75 ühikut kütust.

Koostootmisjaam peab sama koguse elektrienergia jaoks põletama aga:

$$Kütuse\ hulk = \frac{30}{0,3} = 100\ \text{ühikut}$$

Elektritootmisel jääb üle soojust:

$$\text{Ülejääv soojus} = 100 * 0,45 = 45\ \text{ühikut}$$

See soojus kasutatakse otstarbeliselt ära, nagu koostootmisele omapärane.

Kuna elektrijaam ei tooda aga kasulikku soojusenergiat, siis soojusnõudluse rahuldamiseks peab eraldi soojust tootma. 45 ühiku soojuse tootmiseks klassikalise soojaveekatlaga, mille kasutegur on 80%, peab põletama:

$$Kütuse\ hulk = \frac{45}{0,8} = 56\ \text{ühikut}$$

Kui arvestada, et elektri tootmiseks soojuselektrijaamas läks 75 ühikut kütust ja soojusele soojaveekatlas läks 56 ühikut kütust, siis kokku kahe protsessi kütuse summa on:

$$Kütus\ kokku = 56 + 75 = 131\ \text{ühikut}$$

Seega läheb kokku 131 ühikut kütust kahes eraldi protsessis.

Koostootmises läheb aga 100 ühikut.

Võib järeldada, et koostootmises on energiasääst:

$$Kütuse\ sääst = 131 - 100 = 31\ \text{ühikut}$$

See on umbes 24% parem kui soojuselektrijaamal.

Koostootmisjaama kasulikkus seisneb selles, et soojusenergiat saab kusagil kasulikult ära kasutada. Nagu arvutustest on näha, siis tegelikult toodab soojuselektrijaam elektrienergiat efektiivsemalt kui koostootmisjaam.

Ilma soojuse kasutamisetä on koostootmisjaama kasutegur ainult 30%. Seega säästab soojuselektrijaam:

$$Kütuse sääst = 100 - 75 = 25 \text{ ühikut}$$

See tähendab, et soojuselektrijaam on koostootmisjaamast 25% säästlikum, kui soojusele ei ole ette nähtud mingisugust rakendust.

KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli näidata koostootmisjaamade tõelist potentsiaali soojuselektrijaamade ees ning seda Eesti mastaabis. Töös tutvustati soojuselektrijaamu ja koostootmisjaamu, nende ajalugu ning tööpõhimõtteid.

Statistikaameti andmete põhjal on toodud ülevaade energeetika sektori hetkeseisust ja lühiajaloost Eestis. Peamisteks tähelepanekuteks on maagaasi kasutuse vähenemine olenevalt suveräänse energiapoliitika poole püüdlemisest. Maagaasi ja põlevkivi osakaalu vähenemist kompenseerib kodumaine puitkütus, prügipõletus ja tuuleenergia. Seega võib öelda, et energia tootmine Eestis on muutumas jätkusuutlikumaks ja keskkonnasõbralikumaks.

Suuremates asulates Eestis, kus võiks koostootmisjaamade tehnoloogiast kasu olla, on neid juba rakendatud ning seega on arenguruum väike uute koostootmisjaamade loomiseks ja arendamiseks. Vajadus uute koostootmisjaamade järele võiks tekkida vaid juhul, kui riigis loodaks rohkem soojust tarvivaid tööstuseid. Eestis toimub elektrienergia tootmine aga põhiliselt suurtes tsentraliseeritud soojuselektrijaamades, mis asuvad ühes regioonis ning mille jääksoojuse rakendamine on raskendatud.

Arvutustest järeldeb, et kui koostootmisjaamast saadud soojusel pole otstarvet, siis on selle tootlikus põletatava kütuse hulga kohta väiksem, kui suures soojuselektrijaamas. Sellisel juhul on soojuselektrijaam 25% säästlikum. Seega peavad loodavad koostootmisjaamad olema piisavalt sihtotstarbelised ja hästi läbimõeldud.

SUMMARY

The aim of this Master's thesis was to demonstrate the true potential of cogeneration plants in front of thermal power plants and on the Estonian scale. The work introduced thermal power plants and cogeneration plants, their history and operating principles.

On the basis of the data of Statistics Estonia, an overview of the current state of the energy sector and short history in Estonia has been presented. The main findings are a reduction in the use of natural gas, as a result of self sufficient energy policy. The decline in the share of natural gas and oil shale is offset by domestic wood fuel, waste incineration and wind power. Thus, it can be said that energy production in Estonia is becoming more sustainable and environment friendly.

In larger settlements in Estonia, where cogeneration plant technology could be beneficial, they have already been implemented, and so there is little room for development of new cogeneration plants. The need for new cogeneration plants could only arise if more heat-consuming industries were created. In Estonia, however, electricity production is mainly carried out in large centralized thermal power plants located in one region and the use of their waste heat is difficult.

In current thesis it is calculated that if the heat from the cogeneration plant is not used, its yield on fuel savings is lower than in a large thermal power plant. In this case, the thermal power plant is 25% more economical. Thus, if building new cogeneration plants it must be considered that they are well-targeted and well considered.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] Musavvir Mahmud, "Power plant." [Online]. Available: <https://www.studentenergy.org/topics/power-plant>. [Accessed: 13-May-2019].
- [2] Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, "Eesti elektrimajanduse arengukava aastani 2018."
- [3] "Elektri tootmine – Energiatalgud." [Online]. Available: https://energiatalgud.ee/index.php?title=Elektri_tootmine. [Accessed: 15-May-2019].
- [4] Sumit Kumar, "Electricity," 2010. [Online]. Available: <http://indianpowersector.com/2010/10/electricity/>. [Accessed: 15-May-2019].
- [5] J. G. Speight, *Coal-fired power generation handbook*. Wiley, 2013.
- [6] P. A. Breeze, *Power generation technologies*. Elsevier Science, 2005.
- [7] Maury Klein, *The Power Makers: Steam, Electricity, and the Men Who Invented Modern America*. Bloomsbury Publishing USA, 2009.
- [8] D. Sarkar, *Thermal power plant : design and operation*. 2015.
- [9] Taskutark, "Soojuselektrijaam - 4. kursus: Energia." [Online]. Available: <https://www.taskutark.ee/m/soojuselektrijaam/>. [Accessed: 15-May-2019].
- [10] A. Ots, *Soojustehnika aluskursus : termodünaamika. Põlemine. Soojusülekanne : õpik kõrgkoolidele*. .
- [11] B. G. Miller, *Clean coal engineering technology*. Butterworth-Heinemann, 2011.
- [12] J.M.K.C. Donev, "Energy Education - Rankine cycle," 2018. [Online]. Available: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Rankine_cycle. [Accessed: 27-May-2019].
- [13] J. M. V. Antonio Erias, Cansu Karaka, Corinna Grajetzki, James Carton, Mekalia Paulos, Pirjo

- Jantunen, Prajwal Baral, Samal Bex, "World Energy Resources 2016," 2016.
- [14] A. Ots, *Põlevkivi põletustehnika*. Tallinn: Tallinna Raamatutrükikoda, 2004.
- [15] SETIS, "Cogeneration or Combined Heat and Power," *2011 Updat. Technol. map SET-Plan*, p. 10, 2011.
- [16] J. Noordermeer and P. Eng, "COGENERATION and COMBINED-CYCLE PRINCIPLES WORKSHOP©."
- [17] C. Ngô and J. B. Natowitz, *Our energy future : resources, alternatives and the environment*.
.
- [18] A. Chittum and R. N. Elliott, "Combined Heat and Power and Clean Distributed Energy Policies," 2014.
- [19] SETIS, "Cogeneration, or Combined Heat and Power (CHP)."
- [20] O. EPA, "CHP Benefits," 2015. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/chp/chp-benefits>. [Accessed: 29-May-2019].
- [21] Energiatalgud, "Koostootmine." [Online]. Available: https://energiatalgud.ee/index.php/Koostootmine#Soojuse_ja_elektri_koostootmine. [Accessed: 21-May-2019].
- [22] Swapan Basu and Ajay Kumar Debnath, "Pressure Turbine - an overview | ScienceDirect Topics," 2015. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/pressure-turbine>. [Accessed: 21-May-2019].
- [23] Paist Aadu, "Soojuse ja elektri koostootmise tehnoloogiast," *Eesti põlevloodusvarad ja -jäätmed*, pp. 6–9, 2013.
- [24] N. Petchers, *Combined heating, cooling & power handbook : technologies & applications an integrated approach to energy resource optimization*. The Fairmont Press,

2012.

- [25] J. Gilewski and J. Montusiewicz, *COMBINED SYSTEMS OF ENERGY GENERATION – A CHARACTERISATION AND CLASSIFICATION*, vol. 8. 2014.
- [26] S. C. Bhatia and S. C. Bhatia, “Cogeneration,” *Adv. Renew. Energy Syst.*, pp. 490–508, Jan. 2014.
- [27] Sounak Bhattacharjee, “VAPOUR & COMBINED POWER CYCLE - Sounak Bhattacharjee.” [Online]. Available: <http://sounak4u.weebly.com/vapour--combined-power-cycle.html>. [Accessed: 30-May-2019].
- [28] Enertwin, “The micro turbine.” [Online]. Available: <https://www.enertwin.com/enertwin-en/the-micro-turbine-technology>. [Accessed: 30-May-2019].
- [29] Spiegel Colleen, “Fuel Cell Primer,” 2018. [Online]. Available: <https://www.fuelcellstore.com/blog-section/fuel-cell-primer>. [Accessed: 30-May-2019].
- [30] Tesfai Alem, “Small and mighty – the performance of a fuel cell micro-CHP – CIBSE Journal,” 2015. [Online]. Available: <https://www.cibsejournal.com/technical/small-and-mighty-the-performance-of-a-fuel-cell-micro-chp/>. [Accessed: 30-May-2019].
- [31] “Statistics Estonia.” [Online]. Available: <https://www.stat.ee/en>. [Accessed: 02-Jun-2019].
- [32] Eesti Energia, “Elektri ja sooja tootmine.” [Online]. Available: <https://www.energia.ee/et/tehnoloogia/elektri-ja-sooja-tootmine>. [Accessed: 30-May-2019].
- [33] J. Kers, “Eesti biomajanduse ressursside hetkeseisu analüüs 6 väärtusahela põhjal,” Tallinn, Tartu, 2019.
- [34] AS Narva Soojusvõrk, “AS Narva Soojusvõrk.” [Online]. Available: <http://nsv.ee/>. [Accessed: 30-May-2019].
- [35] Utilitas, “Väo II koostoomisjaam,” 2018.

- [36] E. Põlluveer, "KOOSTOOTMISJAAMA RAJAMISE PÕHITÕED JA – KRITEERIUMID EESTI SUURIMATE BOKÜTUSEL TÖÖTAVATE JAAMADE NÄITEL," 2016.
- [37] Eesti Energia, "Agreement signed with GE regarding Auvere power plant," 2016. [Online]. Available: <https://www.energia.ee/en/uudised/avaleht/-/newsv2/2016/11/04/eesti-energia-ja-ge-allkirjastasid-auvere-elektrijaama-puudutava-kokkuleppe>. [Accessed: 31-May-2019].
- [38] S. Andres, "KASUTEGUR ENERGIATOOTMISEL."