



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

Mindaugas Vievesis

**BIOKURO VANDENS ŠILDYMO KATILINĖS ENERGETINIO
EFEKTYVUMO DIDINIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas
Doc. dr. Valdas Lukoševičius

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

**BIOKURO VANDENS ŠILDYMO KATILINĖS ENERGETINIO
EFEKTYVUMO DIDINIMAS**

Baigiamasis magistro projektas
Termoinžinerija (kodas 621E30001)

Vadovas

(parašas) Doc. dr. Valdas Lukoševičius
(data)

Recenzentas

(parašas) Doc. dr. Kęstutis Buinevičius
(data)

Projektą atliko

(parašas) Mindaugas Vievesis
(data)

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

Tvirtinu:

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakulteto
dekanas

Dr. Andrius Vilkauskas

Suderinta:

Šilumos ir atomo katedros vedėjas

Doc. E. Puida

Dekano įsakymas Nr. V25-11-7
2016 m. gegužės mėn. 03 d.

2016 m. gegužės mėn. 03 d.

MAGISTRANTO BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS

*Išduota studentui **Mindaugui Vievesiui***

1. Darbo tema: Biokuro vandens šildymok katilinės energetinio efektyvumo didinimas.
2. Darbo tikslas: Pateikti kelis techninius pasiūlymus biokuro katilinės energetinio efektyvumo didinimui. Detaliau panagrinėti absorbcinio šilumos siurblio įdiegimą biokuro katilinėje.
3. Darbo sudėtinės dalys:
 - 3.1. Biokuro katilinės energetinį efektyvumą lemiantys parametrai.
 - 3.2. Techninės priemonės efektyvumui didinti.
 - 3.3. Degimo produktų ataušinimo pasekmės.
 - 3.4. Absorbcinio šilumos siurblio parinkimas.
 - 3.5. Investicijos atsipirkimo vertinimas.
 - 3.6. Išvados

Užduoties išdavimo data 2016 m. vasario mėn. 01 d.

Užbaigto darbo pateikimo terminas 2016 m. gegužės mėn. 24 d.

Vadovas: doc. dr. Valdas Lukoševičius

_____ 2015-09-07 (vardas, pavardė)

Užduotį gavau: Mindaugas Vievesis

(studento vardas, pavardė)

(parašas, data)

_____ 2015-09-07

(parašas, data)



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

(Fakultetas)

Mindaugas Vievesis

(Studento vardas, pavardė)

Termoinžinerija 621E30001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Biokuro vandens šildymo katilinės energetinio efektyvumo didinimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 ____ . _____ d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Mindaugo Vievesio**, baigiamasis projektas tema „Biokuro vandens šildymo katilinės energetinio efektyvumo didinimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Vievisis M., "Increasing the energy efficiency of the biofuel water heating boiler house".
Master's thesis / supervisor assoc. Valdas Lukoševičius; Kaunas University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering and Design, Department of Thermal and Nuclear Energy.

Research area and field: Energy and Thermal engineering.

Key words: biofuel boiler house, flue gas deep cooling, absorption heat pump.

Kaunas, 2016. 41 p.

SUMMARY

This work briefly introduces several technologies to reduce heat loss in biofuel based heating only boiler plant, detailed examination of absorption heat pump and the boiler plant have been done. Biofuel based water heating boiler plant equipped with absorption heat pump, type and operating parameters adjusted. Estimated impact of absorption heat pump on energy and environmental characteristics of boiler plant. Overall efficiency of biomass based boiler plant with absorption heat pump was simulated and means for improvement offered. Simple payback time of modernization calculated.

Turinys

Įvadas	10
Biokuro katilinės energetinį efektyvumą lemiantys parametrai.....	11
Techninės priemonės energetiniam efektyvumui didinti	13
Oro pertekliaus mažinimas naudojant kūryklas su gazifikacijos dalimi	13
Degimui skirto oro drėkinimas	14
Šilumos siurbliai	15
Degimo produktų ataušinimo gylio pasekmės	17
Trauka.....	18
Šiluminis efektyvumas	20
Aplinkosauga.....	21
Absorbcinis šilumos siurblys	22
Absorbcinio šilumos siurblio tipo parinkimas pagal reikalingą atiduoti šilumos potencialą....	25
Absorbcinio šilumos siurblio parinkimas pagal varomosios šilumos šilumnešį	25
Parenkamasis skaičiavimas.....	27
Patikrinamasis AŠS naudingumo koeficiento skaičiavimas.....	30
Masės balansas	30
Pusiausvyros diagrama.....	31
Entalpijos priklausomybė nuo koncentracijos	31
Šilumos ir masės balansas.....	33
AŠS integravimas biokuro katilinėje.....	35
Ekonomika	36
Išvados.....	39
Literatūra	40

Lentelių sąrašas

1 lentelė AŠS techniniai – ekonominiai rodikliai.....	15
2 lentelė KŠS techniniai – ekonominiai rodikliai.....	16
3 Lentelė Kompresorinio ir absorbcinio šilumos siurblio techninių savybių palyginimas	16
4 lentelė. Skaičiuojamo AŠS taškų parametrai	33
5 lentelė. Orientaciniai AŠS investiciniai kaštai [3]	37

Paveikslų sąrašas

1 pav. Oro pertekliaus koeficiento įtaka kai kurių dūmų komponentų koncentracijoms ir katilinės efektyvumui.....	12
2 pav. Kūrykla su gazifikacijos dalimi.....	13
3 pav. Degimui skirto oro drėkintuvo pajungimas į biokuro katilinės schemą.....	14
4 pav. Oro gebėjimas prisiimti drėgmę, priklausomai nuo temperatūros	14
5 pav. Šilumos siurblių COP priklausomybė nuo ŽPŠ temperatūros.	15
6 pav. Kompresorinio ir absorbcinio šilumos siurblių kiekybinis palyginimas.....	16
7 pav. Standartinė biokuro katilinė su kondensaciniu ekonomizeriu	17
8 pav. Natūralios traukos priklausomybė nuo dūmų temperatūros. Priėmus $H=35$ m, $\rho_{00} = \rho_{d0}$, $t_0 = 0^\circ\text{C}$	19
9 pav. Dūmų teperatūros įtaka dūmsiurbio vartojamai elektros energijai.....	19
10 pav. biokuro katilinės efektyvumas pagal žemutinį efektyvumą.	21
11 pav. Kietųjų dalelių koncentracijos priklausomybė nuo dūmų temperatūros	21
12 pav. CO ir NO _x koncentracijos dūmuose pro kaminą priklausomybė nuo temperatūros.....	22
13 pav. Absorbcinio šilumos siurblio principinė schema. A-absorberis, C-kondensatorius, E-garintuvas, G-generatorius, P-tirpalo siurblys, SHX-tirpalo šilumokaitis, ER-šaldymo agento (vandens) išsiplėtimo vožtuvas, ES- tirpalo išsiplėtimo vožtuvas	23
14 pav. Absorbcinio šilumos siurblio veikimo schema P-T koordinatėse	24
15 pav. Absorbcinio šilumos siurblio, komponentų išsidėstymas	24
16 pav. AŠS tipo parinkimas pagal reikalingą atiduoti šilumos temperatūrą	25
17 pav. Karštu vandenius varomas absorbcinis šilumos siurblys ir jo jungimo schema katilinėje	26
18 pav. Garu varomas absorbcinis šilumos siurblys	26
19 pav. Degimo produktais varomas absorbcinis šilumos siurblys ir jo jungimo schema katilinėje	27
20 pav. Liepsna varomas absorbcinis šilumos siurblys ir jo jungimo schema katilinėje.....	27
21 pav. Kai į absorberį paduodama 40 C	29
22 pav. UAB „Geoterma“ AŠS temperatūrų rinkiniai	29
23 pav. Danijos miesto Hillerød biokuro katilinės su AŠS vandens kontūro schema	30
24 pav. Ličio bromido tirpalo pusiausvyros diagrama.....	31
25 pav. Ličio bromido tirpalo entalpijos priklausomybė nuo koncentracijos ir temperatūros.....	32
26 pav. Garo entalpijos nustatymas prie atitinkamo slėgio [18].....	33
27 pav. Biokuro katilinės efektyvumo priklausomybės nuo grįžtančiojo termofikato temperatūros ir kuro drėgnumo. Katilinė su KE (punktyras), su KE ir AŠS (ištisa). Oro pertekliaus koeficientas 1,5; oro temperatūra 0 °C.	35
28 pav. Biokuro katilinės su absorbciniu šilumos siurbliu principinė schema	36
29 pav. Biokuro kainos prognozė 2021 m. [21].....	37
30 pav. Nominalių investicijų į AŠS įdiegimą įtaka PAL.....	37
31 pav. AŠS įdiegimo PAL priklausomybė nuo darbo valandų skaičiaus per metus. Kai COP=1.75; $B_{kuro}=170$ €/ t _{ne} ; NI=300 €/kW	38
32 pav. AŠS įdiegimo PAL priklausomybė nuo kuro kainos. Kai COP=1.75; NI=300 €/kW; dirba 8000 h per metus.	38
33 pav. PAL priklausomybė nuo AŠS tobulėjimo	39

Santrumpos

AŠS – absorbcinis šilumos siurblys;

KŠS – kompresorinis šilumos siurblys;

APŠ – aukšto potencialo šiluma;

ŽPŠ – žemo potencialo šiluma;

CŠT – centralizuotas šilumos tiekimas;

VŠK – vandens šildymo katilas;

KE – kondensacinis ekonomizeris;

COP – šilumos siurblio naudingumo koeficientas;

PAL – paprastas atsipirkimo laikas.

Įvadas

Vienas iš pagrindinių Lietuvos nacionalinės energetikos tikslų yra efektyvumo didinimas, generuojant energiją [1]. Prie šio tikslo įgyvendinimo galima prisidėti didinant biokuro katilinių energetinį efektyvumą.

Biokuras yra vienas iš pagrindinių atsinaujinančios energijos rūšių Lietuvoje ir beveik visose Europos Sąjungos šalyse [2]. Šiuolaikinėse biokuro katilinėse dažniausiai deginamos žalios medienos drožlės, turinčios savyje iki 60 % vandens. Medienos kure esantis vanduo mažina biokuro katilinės efektyvumą.

Yra nusistovėjęs katilinių efektyvumo skaičiavimas pagal žemutinį kuro šilumingumą, kuris neįvertina dūmuose esančių vandens garų kondensacijos šilumos. Todėl šiuolaikinių biokuro katilinių šiluminis efektyvumas, dėl naudojamų kondensacinių ekonomizerių, siekia 100 % ir daugiau, skaičiuojant pagal žemutinį kuro šilumingumą.

Ekonomizeriuose panaudojama dalis žemo potencialo dūmų šilumos. Kondensacinio ekonomizerio galia labai priklauso nuo grįžtančio iš tinklų termofikacinio vandens temperatūros bei dūmuose esančio vandens garo koncentracijos. Dūmuose esančio vandens garo koncentraciją lemia; oro pertekliaus, vandenilio kiekis biokure, oro ir kuro drėgnumas. Degdamas vandenilis oksiduojasi į vandens garus.

Darbe aptariamos kelios technologijos didinančios garo koncentraciją dūmuose ir taip didinančios biokuro vandens šildymo katilinės kondensacinio ekonomizerio galią. Detaliau nagrinėjamos technologijos skirtos paimti papildomą šilumos kiekį, labiau ataušinant dūmus, standartinėse biokuro katilinėse.

Žemo potencialo dūmų šilumos atgavimui naudojami tiek absorbciniai, tiek ir kompresoriniai šilumos siurbliai. Preliminariai įvertinama koks šilumos siurblio tipas tinkamiausias biokuro katilinės energetiniam efektyvumui didinti.

Biokuro katilinėse šalinama šiluma pro kaminą yra palyginti žemo potencialo: po kondensacinio ekonomizerio dūmų temperatūra būna apie 50 °C. Danijos praktiniai pavyzdžiai įrodė, kad tolimesniam ekonomiškam tokio potencialo šilumos atgavimui gali būti panaudoti absorbciniai šilumos siurbliai, kurie yra varomi katilinėje, gauta aukšto potencialo šiluma [3,4,5]. Tačiau šilumos siurblio technologija biokuro katilinėje turi trūkumų. Pagrindinis trūkumas, stabdantis platesnę technologijos panaudojimą katilinėje yra padidėjusios nominalios investicijos į šilumos generavimo galią.

Būta ir ankstesnių bandymų įdiegti AŠS Lietuvos biokuro katilinėje [6]. Bet dėl netinkamo AŠS planavimo biokuro katilinėje Valstybinė kainų ir energetikos kontrolės komisija tokiai investicijai nepritarė. AŠS kainą ir naudingumo koeficientą lemia ne tik varomosios APŠ temperatūra, o visas AŠS temperatūrų rinkinys.

Darbe nagrinėjamos techninės priemonės biokuro katilinės energetinio efektyvumo didinimui. Įvertinama AŠS įdiegimo biokuro katilinėje galimybės ir tikslingumas, lyginant įvairias alternatyvas.

Biokuro katilinės energetinį efektyvumą lemiantys parametrai

Biokuro katilinių bandymo standartuose yra naudojamas atvirkštinio efektyvumo balanso metodas. Metode išskirti nuostoliai lemiantys biokuro katilinės energetinį efektyvumą. Metodu nustatomas katilinės naudingumo koeficientas;

$$\eta = 100 - Q_2 - Q_3 - Q_4 - Q_5 - Q_6 \quad (1)$$

Čia dydžiai išreikšti procentais;

100 – Atitinka biokuro sąnaudas, pagal žemutinį šilumingumą;

Q_2 – Šilumos nuostoliai su dūmų šiluma. Tai patys didžiausi nuostoliai - pagrindiniai, gali siekti 10-40 %. Šių nuostolių dydį galima sumažinti mažinant oro pertekliaus koeficientą ir dūmų temperatūrą;

Q_3 – Šilumos nuostoliai, atsirandantys kai dėl nepilno cheminio kuro sudegimo kartu su dūmais išmetami degūs dujiniai produktai, pavyzdžiui CO (smalkės), CH₄ (metanas) ar aukštesnės eilės angliavandeniliai. Tai tas pat, kaip pro kaminą išmesti dalį kuro. Šiuolaikinėje tinkamai sureguliuotoje biokuro katilinėje šių nuostolių nebūna arba jie labai maži, lyginant su kitais nuostoliais;

Q_4 – Šilumos nuostoliai dėl nepilno “mechaninio” kuro sudegimo, kai su dūmais išnešama daug suodžių ir kuro dalelių - t.y. degios medžiagos. Gerai sureguliuotoje biokuro katilinėje šie nuostoliai maži;

Q_5 – Šilumos nuostoliai, atsirandantys dėl šiltų ar karštų katilo išorinių paviršių. Ši šiluma patenka į patalpą kur stovi katilas, bet nešildo vandens. Šie nuostoliai gerai izoliuotų katilų paprastai būna iki 1 % ir mažiau;

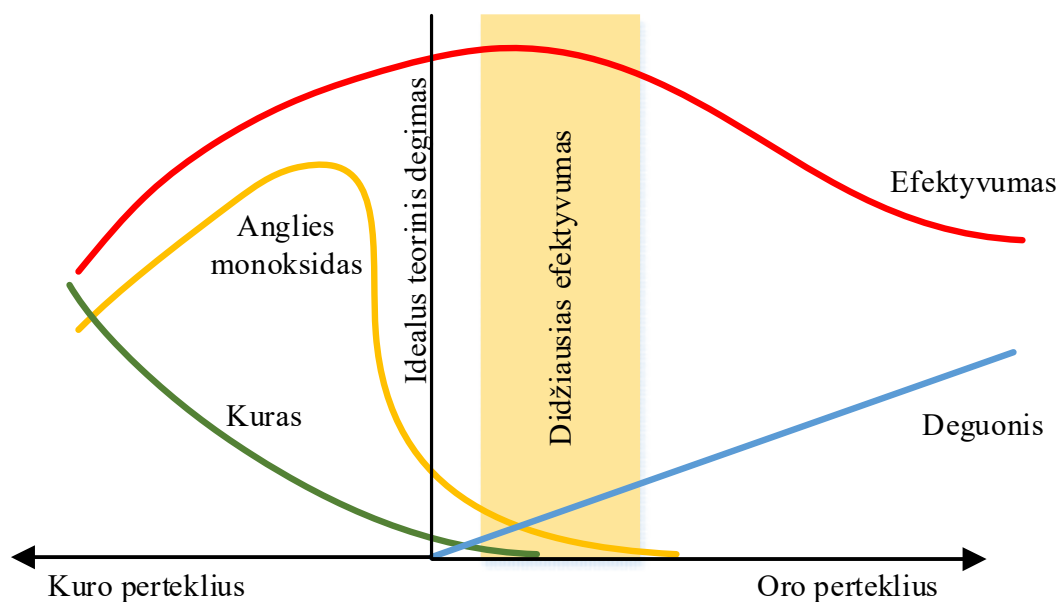
Q_6 – Šilumos nuostoliai, atsirandantys dėl to, kad dalis kieto kuro prabyrėjo pro ardelius ir nesudegė ir buvo išmesta su pelenais. Šie nuostoliai nežymūs, kai deginamas projektinės frakcijos kuras.

Šiuolaikinių biokuro katilinių, Q_3 , Q_4 ir Q_6 nuostoliai būna labai maži (artėjantys prie 0-0,5%) , o tinkamai izoliuoto katilo Q_5 siekia ne daugiau kaip 0,5- 1%, tada apytikriam katilinės naudingumo koeficiento nustatymui pakanka tik Q_2 – pačių pagrindinių šilumos nuostolių. Naudingumo koeficiento radimas tik pagal šiuos nuostolius:

$$\eta \approx 100 - Q_2 \quad (2)$$

Q_2 nuostolius lemia oro pertekliaus koeficientas, tai daugiklis parodantis kiek daugiau tiekiama degimui skirto oro, negu jo teoriškai reikia. Teorinis degimui skirto oro kiekis būtų, kai kiekviena degimo oro deguonies molekulė dalyvautų pilno degimo reakcijose.

Mažinant oro kiekį iki tam tikros ribos, pradeda susidaryti nepilno degimo produktai – CO, angliavandeniliai C_nH_m , suodžiai.



1 pav. Oro pertekliaus koeficiento įtaka kai kurių dūmų komponentų koncentracijoms ir katilinės efektyvumui.

Biokuro katilinė veiks ekonomiškiausiai, kai oro kiekis yra galimai mažesnis (mažesni šilumos nuotoliai su dūmais), tačiau nepilno degimo produktų (pvz. CO) koncentracija dar maža 1 pav. Biokuras deginamas su didesniu nei 1 oro pertekliaus koeficientu nes degant kurui mažėja degimo reakcijose dalyvaujančių komponentų koncentracijos, ko pasekoje mažėja degimo reakcijų greitis [7];

$$w = k \cdot C_A^\alpha \cdot C_B^\beta \quad (3)$$

k – reakcijos greičio priklausomybė priklausanti nuo temperatūros ir medžiagų cheminės prigimties.

C_A, C_B – reaguojančių medžiagų molinės koncentracijos, $\frac{mol}{m^2 \cdot s}$;

α, β – reaguojančių medžiagų molių skaičiai.

Priežastys reikalaujančios padidinti oro perteklių;

- biokuro šilumingumo svyravimas;
- barometrinio slėgio svyravimas, svyravimai siekia $\pm 2,5\%$ nuo vidutinės reikšmės, atitinkamai keičiasi ir ventiliatoriais tiekiamo degimo oro tankis;
- degimui skirto oro temperatūros svyravimas. Vėstant oras tankėja. Ventiliatoriai sureguliuoti į kūryklą tiekti tūrinį debitą oro. Tačiau degimo reakcijoms vykti iš tikro svarbus ne tūrinis, o masinis debitas, kuris tiesiogiai proporcingas oro tankiui;
- netolygus biokuro pasiskirstymas ardyninėje kūrykloje;

Dėl visų šių priežasčių katilų degimo režimo derinimo metu derintojai nustato žymiai aukštesnį oro perteklių, kad bet kuriuo atveju kuras sudegtų pilnai. Katilinei dirbant optimalų oro perteklių padeda palaikyti nuolatinis deguonies ir anglies monoksido matavimas dūmuose [8].

Q_2 nuostolius taip pat lemia išeinančių pro kaminą dūmų temperatūra. O dūmų temperatūra tiesiogiai priklauso nuo grįžtančio iš CŠT termofikacinio vandens temperatūros.

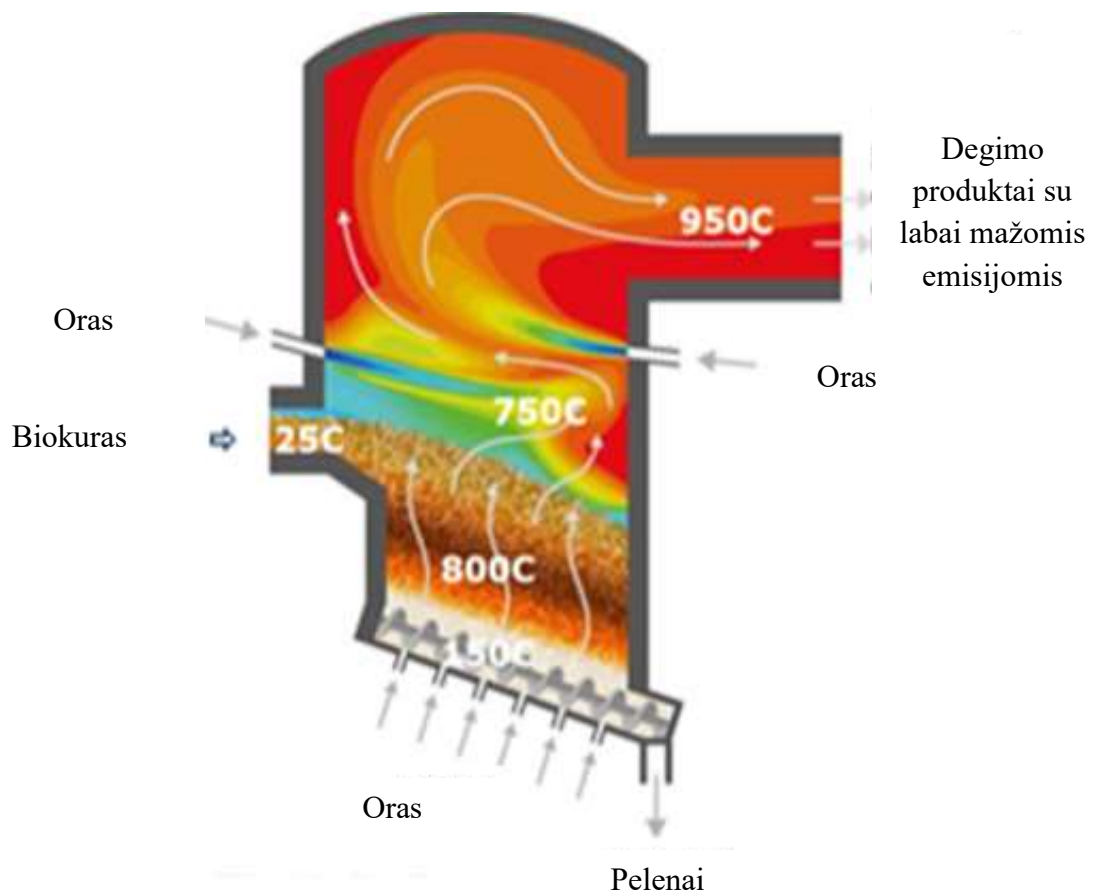
Termofikaciniu vandeniu vėsinant dūmus iki rasos taško atitinkamai didėja katilinės šiluminis efektyvumas, pagal tiesinę priklausomybę. Po dūmų rasos taško temperatūros (50-70 °C), dūmų vėsinimas katilinės efektyvumą didina eksponentiškai. Prisideda garų kondensacijos šiluma.

Techninės priemonės energetiniam efektyvumui didinti

Oro pertekliaus mažinimas naudojant kūryklas su gazifikacijos dalimi

Kūryklose su gazifikacijos dalimi 2 pav. [9] kuro sluoksnis storesnis nei ardyninėse, todėl mažesni kuro netolygumai. Kūrykla turi mažai judančių dalių lyginant su kitomis biokuro kūryklomis, todėl numatomas patikimesnis ir ilgesnis tarnavimo laikas. Kūryklos apačioje vykdomas gazifikacijos procesas, kurio organizavimas priskiriamas prie efektyviausio biokuro deginimo. Galima dirbti su mažesniu oro pertekliumi 1,3, vietoj 1,4 (ardyninėse kūryklose) ir dar turėti mažesnes emisijas.

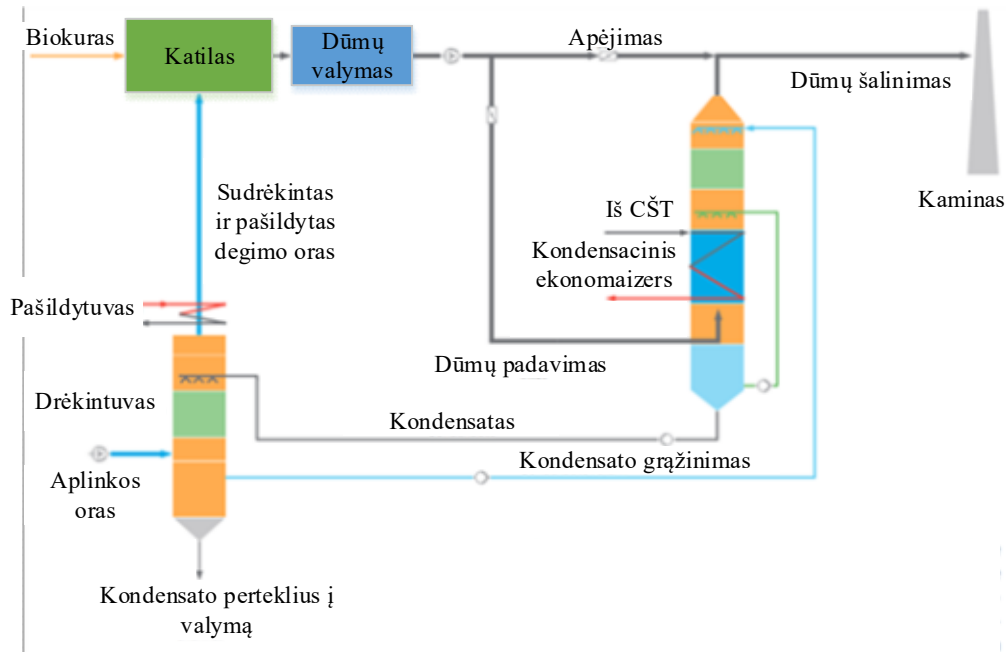
Technologija nėra brandi, bet jau atsiranda komerciniuose biokuro katilinių projektuose. Perspektyvi ateityje.



2 pav. Kūrykla su gazifikacijos dalimi

Degimui skirto oro drėkinimas

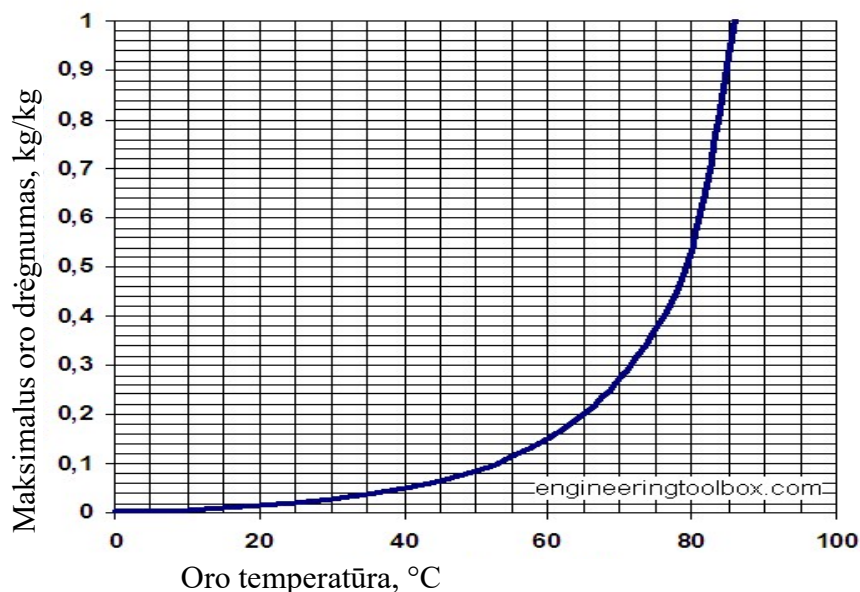
Biokuro katilinės KE efektyvumą iš dalies lemia garų koncentracija dūmuose. Kuo daugiau dūmuose garų tuo juose slypi didesnė kondensacijos šilumos dalis. Norint padidinti garų kiekį dūmuose galima drėkinti degimui skirtą orą.



3 pav. Degimui skirto oro drėkintuvo pajungimas į biokuro katilinės schemą

Oro drėkinimo organizavimas biokuro katilinėje pateiktas 3 pav. [10] Kondensatas iš KE tiekiamas į degimo oro drėkintuvą. Kondensatas išpurškiamas lašeliais, kad susidarytų didelis šilumos mainų ir garavimo plotas. Atsiplėšti nuo lašelio ir išgaruoti gali tik daugiausiai energijos turinčios vandens molekulės. Sumažėjus lašelio molekulių vidutiniai energijai, sumažėja ir jo temperatūra.

Oro įsisotinimas vandeniu nuo temperatūros priklauso eksponentiškai 4 pav. [11]



4 pav. Oro gebėjimas prisiimti drėgmę, priklausomai nuo temperatūros

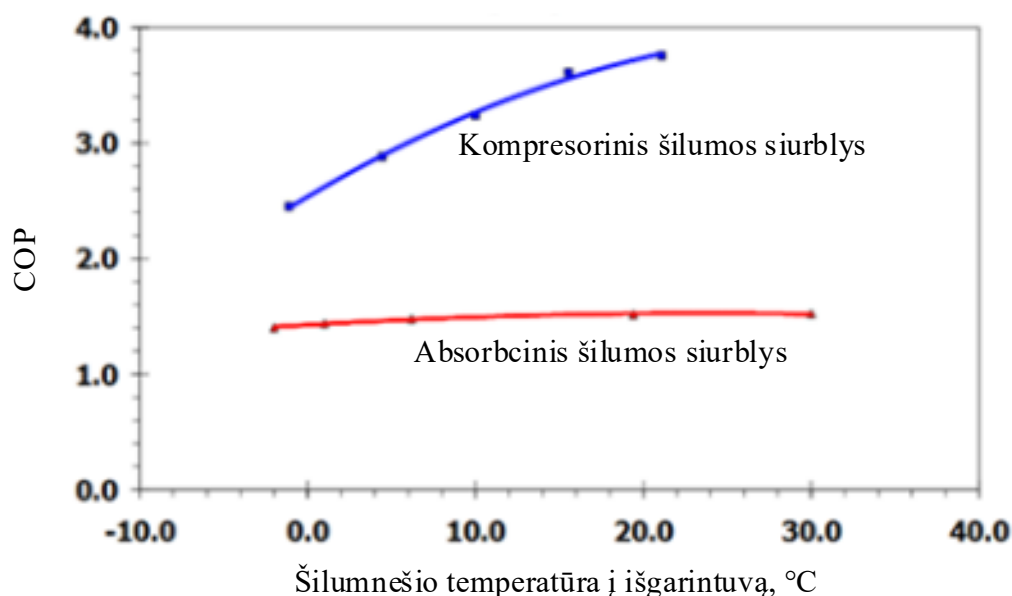
Lietuvos biokuro katilinėse, dažniausiai dalis biokuro saugojamas atvirose biokuro saugojimo aikštelėse. Deginamo biokuro drėgnumą iš dalies lemia metų laikas.

Per didelis balastinės drėgmės kiekis kūrykloje mažina liepsnos temperatūrą ir degimo reakcijose dalyvaujančių komponentų koncentracijas. Abu šie faktoriai mažina degimo reakcijos greitį. Prastėja degimo kokybė. Balastas didina dūmų trakto aerodinaminį pasipriešinimą.

Technologija darbe nenagrinėjama.

Šilumos siurbliai

Šilumos siurbliai katilinėse naudojami labiau ataušinti degimo produktų temperatūrą ir taip paimti papildomą šilumos kiekį. Toliau palyginami kokio tipo šilumos siurbliai tinkamesni biokuro katilinės energetiniam efektyvumui didinti kompresoriniai ar absorbciniai.



5 pav. Šilumos siurblių COP priklausomybė nuo ŽPS temperatūros.

Iš 5 pav. matyti, kad KŠS COP yra jautresnis ŽPS temperatūrai [12]. Reiškia kad dūmų ataušinimo gylis turėtų mažesnę poveikį AŠS COP.

1 lentelė ir 2 lentelė pateikiami pagrindiniai AŠS ir KŠS parametrai. Kaip matyti šilumos siurblių technologijoms prognozuojamas COP didėjimas.

1 lentelė AŠS techniniai – ekonominiai rodikliai

	Absorbcinis šilumos siurblys dūmų kondensacijai			
Metai	2010	2020	2030	2050
COP	1,7	1,75	1,8	1,85
Vieno AŠS galia, MW	2-15			
Tarnavimo laikas, m	20			
Montavimo laikas, m	0,5-1			
Darbo agentas	Amoniakas arba Ličio bromidas			
Nominalios investicijos, mil. € /MWš	0,35-0,40			
Ekspluatacinės išlaidos €/MWš	15-20000			

2 lentelė KŠS techniniai – ekonominiai rodikliai

	Kompresorinis šilumos siurblys, šilumos šaltinis: 35 °C			
	2010	2020	2030	2050
COP	3,6	3,7	3,8	3,8
Vieno KŠS galia, MW	1-10			
Tarnavimo laikas, m	20			
Montavimo laikas, m	0,5-1			
Darbo agentas	Neutralus			
Nominalios investicijos, mil. € /MWš	0,45-0,85	0,4-0,8	0,35-0,75	0,3-0,7
Eksplotacinės išlaidos €/MWš	3500-7000	2300-4700	2300-4700	2300-4700

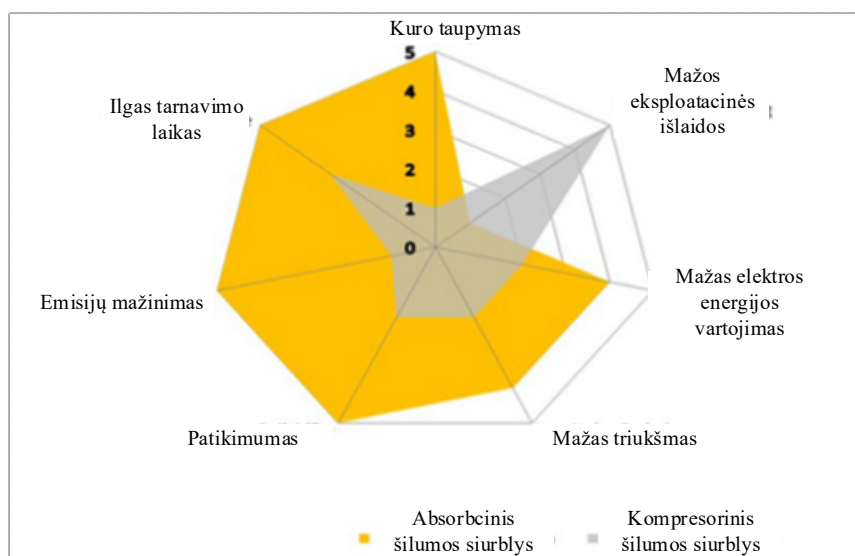
AŠS pranašumai prieš KŠS:

- Mažiau energijos konversijų, kol pirminė energija sukuria slėgių skirtumą šilumos siurblyje;
- Vartoja labai mažai elektros energijos lyginant su kompresoriniu;
- COP pastovus 30 – 100 % galios ribose;
- Minimali galia 10 %;
- Patikimas veikimas.

3 Lentelė palyginamos techninės savybės. Biokuro katilinėje kinta kuro drėgnumas todėl svyruoja ir šilumos nuostoliai pro kaminą. AŠS lankstesnis galios reguliavimas leistų šilumos siurbliui dirbti optimaliu režimu, prisitaikant prie ŽPŠ šaltinio galios svyravimo.

3 Lentelė Kompresorinio ir absorbcinio šilumos siurblio techninių savybių palyginimas

Šilumos siurblys	Absorbcinis	Kompresorinis
Varomoji energija	Šilumos energija	Elektros energija
Galios reguliavimas	Labai geras	Blogas
Besisukančios dalys	3 maži siurbliai	1 kompresorius
Triukšmas ir vibracija	Nėra	yra
Darbinis slėgis	Vakuumas	1 – 20 bar.
Darbo terpė	LiBr ir vandens binarinis mišinys	Amoniakas, angliavandeniliai
Poveikis pasauliniam atšilimui	Nėra	Yra, su kai kuriais šaldymo agentais



6 pav. Kompresorinio ir absorbcinio šilumos siurblių palyginimas

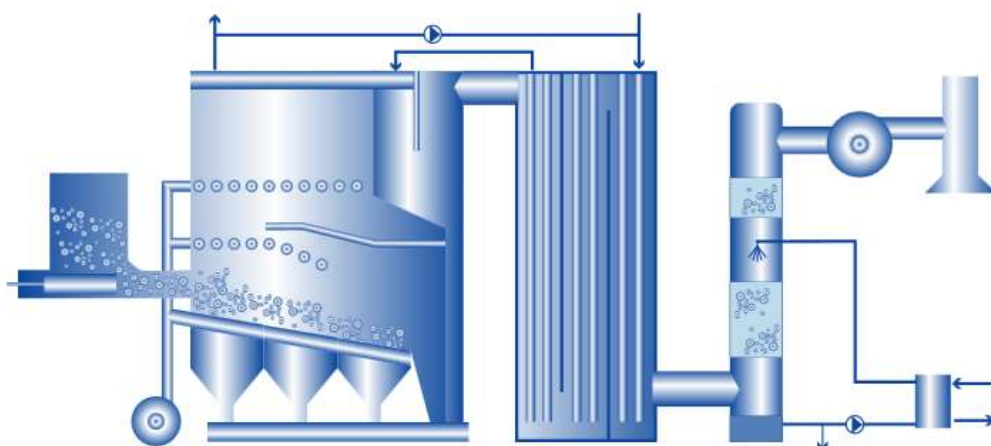
6 pav. pavaizduotas KŠS ir AŠS palyginimas. Pagrindinius skirtumus lemia tai, kad AŠS vietoje mechaninio turi termocheminį kompresorių, sudarytą iš dviejų šilumokaičių; absorberio ir generatoriaus.

KŠS ekonominę patrauklumą lemia elektros energijos ir šilumos kainų santykis. KŠS rentabilus kai šis santykis neviršija 3-4. Tai gali būti tik nakties metu, kai elektros energijos paklausa sumažėja, taip atpigindama kainą.

Dėl numatomo KŠS mažo išnaudojamumo toliau nagrinėjamas tik AŠS integravimas biokuro katilinėje.

Degimo produktų ataušinimo gylio pasekmės

Degimo produktų ataušinimo gylio pasekmės atliekamos remiantis standartine biokuro katilinė 7 pav.



7 pav. Standartinė biokuro katilinė su kondensaciniu ekonomizaizeriu

Užsidedami standartinės biokuro katilinės parametrai. Bendra katilinės galia – 20 MW (du vandens šildymo katilai po 8 MW ir kondensacinis ekonomizaizeris 4 MW);

Biokuras medienos kilmės.

Katilo agregato, susidedančio iš katilo ir pakuros, parametrai;

Didžiausias leidžiamas slėgis	12 bar.;
Eksploatacinis slėgis	10 bar.;
Didžiausia leidžiamoji vandens temperatūra	150 °C;
Eksploatacinė vandens temperatūra iš katilo	130 °C;
Eksploatacinė vandens temperatūra į katilą	100 °C;
Papildymo vandens slėgis	8-10 bar.;
Katilo agregato naudingumo koeficientas	85 %

Katilo hidraulinis pasipriešinimas	0,3 bar.
Dūmų slėgio nuostoliai	900 Pa
Dūmų temperatūra už katilo	180 °C
Dūmų temperatūra iš pakuros	iki 1050 °C
Pakuros galia	9,5 MW.

Kondensacinio ekonomaizerio (KE) parametrai;

Galia, katilams dirbant nominlia 16 MW galia	4 MW;
Grižtančio termofikacinio vandens temperatūra	43 °C;
Maksimalus kietųjų dalelių kiekis dūmuose po KE	100 mg/nm ³ ;
Dūmų slėgio nuostoliai, esant 9,453 nm ³ /s debitui	1130 Pa;
Dūmų temperatūra po ekonomaizerio	46-50 °C;
Nominlus dūmų srautas per KE	89300 m ³ /h;
Nominalus vandens debitas per KE	600 m ³ /h;
Termofikacinio vandens slėgio nuostoliai	0,6 bar;
Drenuojamo kondensato kiekis	iki 5 m ³ /h;

Kiti parametrai;

Biokuro drėgnumas	50 %;
Katilinėje susidarančio pelenų kiekis	265 kg/h;
Degimo oro debitas	36992 m ³ /h;
Darbo valandų skaičius per metus	8000 h;
Kamino aukštis ir skersmuo	H=35 m; D=1,2 m;
Biokuro sąnaudos	8840 kg/h.

Trauka

Katilinėje dūmai šalinami per kamina, kuriame palaikoma trauka. Trauka susideda iš natūralios ir priverstinės.

Natūrali trauka atsiranda dėl kamine esančių dūmų ir aplinkos hidrostatinio slėgių skirtumo.

$$\Delta p_{nt} = gH \left(\frac{\rho_o^0}{273+t_o} - \frac{\rho_d^0}{273+t_d} \right) 273 \quad (4)$$

Čia Δp_{nt} – natūralios traukos sukeltas slėgių skirtumas, Pa;

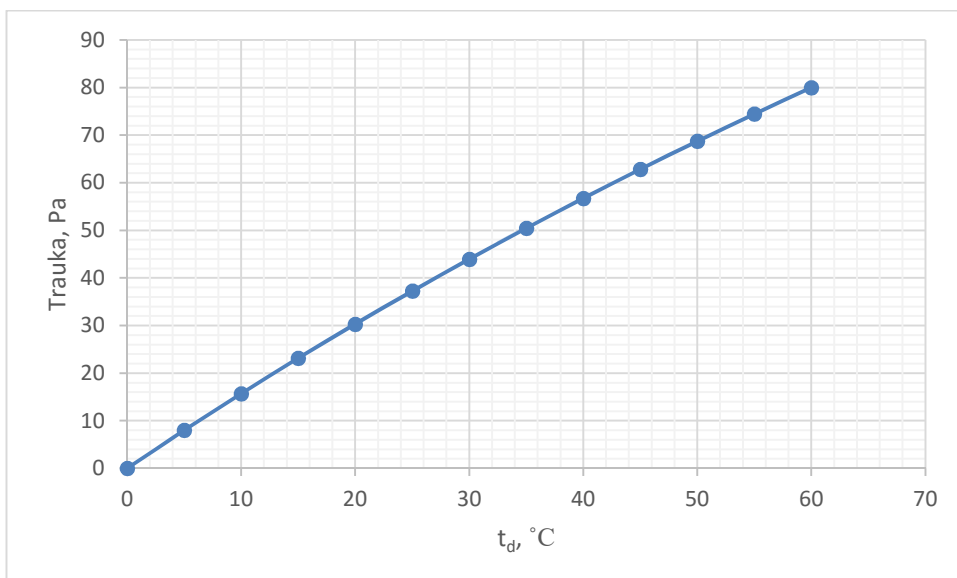
g – laisvojo kritimo pagreitis: 9,81 m/s²;

H – kamino aukštis, m.;

ρ_o^0 – aplinkos oro tankis prie normlių sąlygų: 1,293 kg/m³;

t_o – aplinkos oro temperatūra, °C;

ρ_d^0 – dūmų tankis prie normalių sąlygų.



8 pav. Natūralios traukos priklausomybė nuo dūmų temperatūros. Priėmus $H=35$ m, $\rho_o^0 = \rho_d^0$, $t_o = 0^\circ\text{C}$

Priverstinę trauką sukuria dūmsiurbiai. Dūmsiubių vartojama elektrinė galia;

$$N = \frac{(\Delta p - \Delta p_{nt})V}{\eta} \quad (5)$$

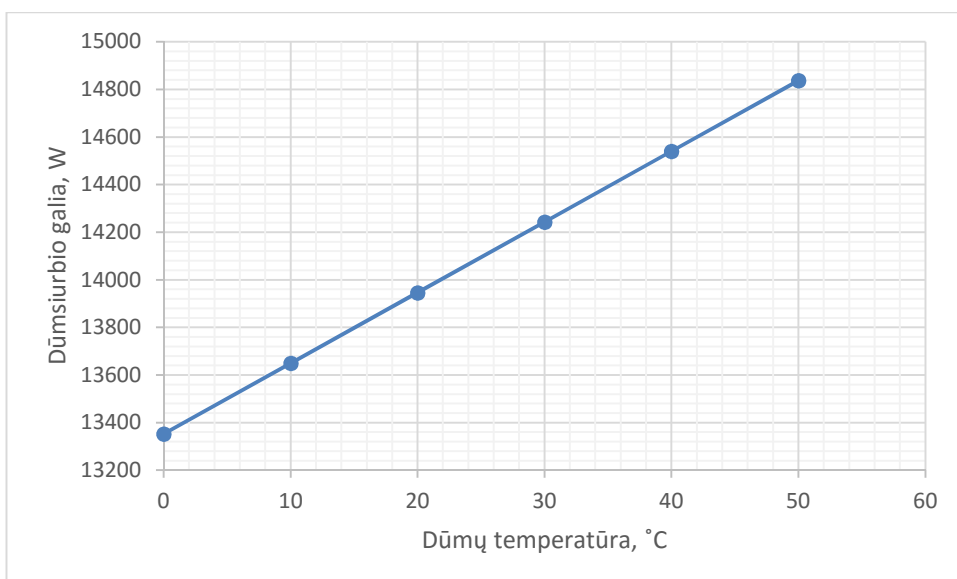
Čia N – dūmsiurbio vartojama elektrinė galia, W;

Δp – slėgių skirtumas reikalingas airodinaminiam pasipriešinimui nugalėti, Pa;

V – dūmų tūrinis debitas, m^3/s ;

η – dūmsiurbio naudingumo koeficientas.

Remiantis standartinės biokuro katilinės veikimo parametrais nustatoma kokią įtaką dūmsiurbio vartojamai elektros energijai, daro mažėjanti dūmų temperatūra.



9 pav. Dūmų temperatūros įtaka dūmsiurbio vartojamai elektros energijai

Pagal 9 pav. ataušinus dūmus papildomai 5 °C, dūmsiurbio vartojama elektros galia sumažėja apie 1 %.

Palyginus natūralios traukos sukuriama slėgį 8 pav. su dūmsiurbio reikalingu slėgiu įveikti aerodinaminį pasipriešinimą matyti, kad pramoninėse katilinėse natūrali trauka nesudaro ženklios dalies. Krentant dūmų temperatūrai, mažėja tūrinis debitas, to pasekoje mažėja dūmsiurbio galia.

Dar įvertinus, kad mažėjant dūmų temperatūrai; mažėja ir dūmų debitas dėl išsikondensavusios dūmų drėgmės, bei mažėjant dūmų greičiui kamine mažėja aerodinaminiai pasipriešinimai, dūmsiurbio elektros sąnaudos krentant temperatūrai dar staigiau mažėtų.

Kad pramoniniu būdu generuojant energiją, mažėjant dūmų temperatūrai mažėja ir dūmsiurbio vartojama elektros energijos galia patvirtina literatūra [14].

Šiluminis efektyvumas

Apskaičiuojami šilumos nuostoliai pro kaminą;

$$h_{LFG} = 4107 \cdot \left(0,62 + u + \lambda \cdot \left(0,59 + 1,45 \cdot x_{CA} - \frac{2,07}{\frac{p_{FG}}{4064,95} - 1} \right) \right) \cdot \left(T_{FGO} - T_{amb} \right) + \frac{9201605 \cdot \lambda}{\frac{p_{FG}}{4064,95} - 1} - \frac{9385066}{\frac{p_{amb}}{4064,95} - 1} \quad (6)$$

Čia h_{LFG} – su dūmais pro kaminą išėianys šilumos nuostoliai sauso kuro atžvelgiu, J/(kg_{Fdry}·s);

u – biokuro drėgnumas, kg_{vanduo}/ kg_{Fdry};

λ – oro pertekliaus koeficientas;

x_{CA} – degimo oro drėgnumas, kg_{vanduo}/ kg_{sausasoras};

p_{FG} – degimo produktų slėgis, mbar;

p_{amb} – aplinkos oro slėgis, mbar;

T_{FGO} – išėinančių degimo produktų temperatūra, °C;

T_{amb} – aplinkos oro temperatūra, °C.

Vertinant tik šilumos nuostolius pro kaminą, katilinės efektyvumui apskaičiuoti galima naudoti formulę:

$$\eta_{LHVP} = \frac{\Delta h_{UHV} - h_{LFG}}{\Delta h_{LHV}} \quad (7)$$

Čia η_{LHVP} – katilinės naudingumo koeficientas pagal žemutinį šilumingumą;

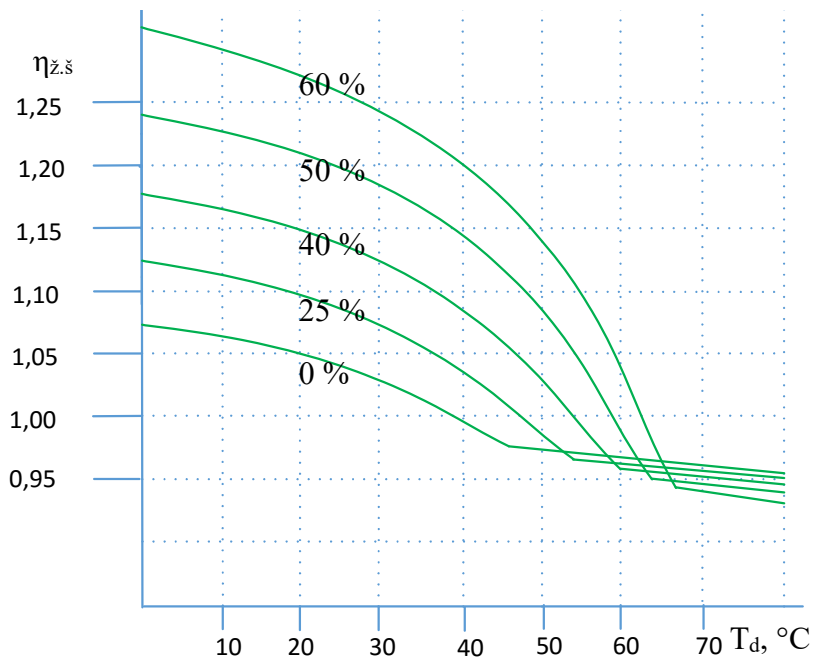
Δh_{UHV} – aukštutinis standartinio biokuro šilumingumas, J/kg_{Fdry};

Δh_{LHV} – žemutinis standartinio biokuro šilumingumas, J/kg_{Fdry}.

Žemutinio standartinio biokuro šilumingumo apskaičiavimas;

$$\Delta h_{LHV} = \Delta h_{UHV} - (u + 0.54) \cdot \Delta h_v \quad (8)$$

Čia Δh_v – slaptoji vandens garų kondensacijos šiluma (2,5016·10⁶ J/ kg_v)



10 pav. Biokuro katilinės efektyvumas pagal žemutinį kuro šilumingumą priklausomai nuo dūmų temperatūros pro kamina, prie skirtingo biokuro drėgnumo, kai $\lambda = 1,5$

Aplinkosauga

Pagal valstybinį strateginį atliekų tvarkymo planą [17] atliekos turi būti tvarkomos pagal šiuos prioritetus;

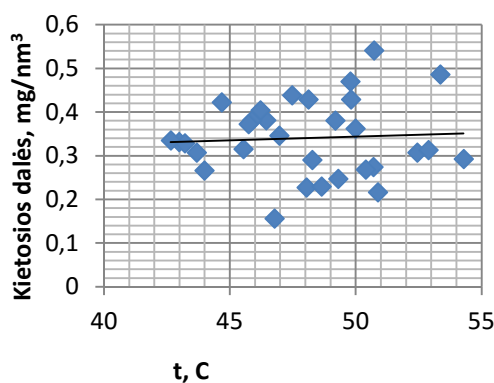
1. Atliekų vengimas;
2. Atliekų naudojimas;
3. Atliekų šalinimas.

Deginant medienos skiedrą katilinėje susidaro pelenai. Šių pelenų tolimesnis panaudojimas yra draudžiamas, kai sunkiųjų metalų koncentracijos viršija normines [18].

Didžioji dalis pelenų iš Lietuvos biokuro katilinių viršija leistinas sunkiųjų metalų koncentracijas, todėl yra šalinami į sąvartynus. Išvežimas mokamas. Katilinėje įgyvendinant kuro taupymo priemones mažėtų ir pelenų kiekiai tenkantys generuotam šilumos vienetui.

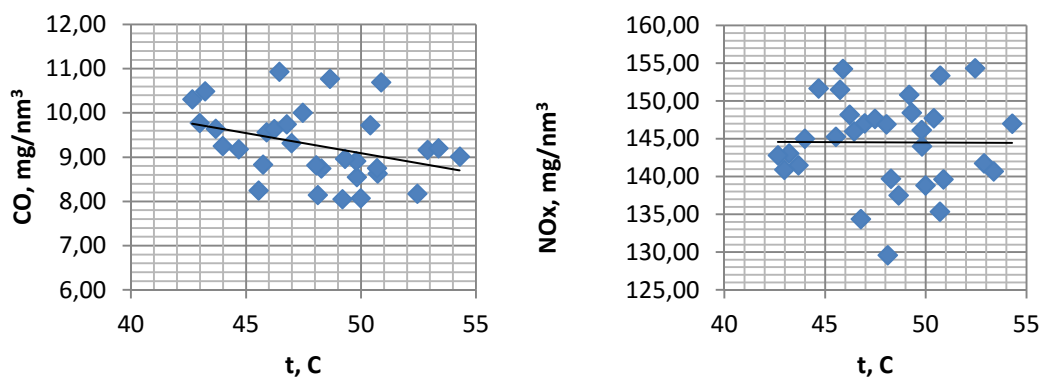
Įvykdomas pirmas atliekų tvarkymo hierarchijos prioritetas.

Emisijų priklausomybei įvertinti nuo dūmų ataušinimo naudoti UAB „Fortum Klaipėda“ biokuro termofikacinės jėgainės praktiniai duomenys [25].



11 pav. Kietųjų dalelių koncentracijos priklausomybė nuo dūmų temperatūros

Papildomas kondensatas papildomai praskiedžia dūmus todėl kietųjų dalelių emisijos į aplinką mažėja mažėjant dūmų temperatūrai 11 pav.



12 pav. CO ir NOx koncentracijos dūmuose pro kaminą priklausomybė nuo temperatūros

Dujų tirpumas vandenyje didėja mažėjant temperatūrai. Bet dujų mišiniai elgiasi kitaip nei grynos dujos. pirmiausia ištirpsta tirpiausias, o kitoms gali vietos ir nelikti. Tai patvirtina UAB „Fortum Klaipėda“ matavimai 12 pav.

Absorbcinis šilumos siurblys

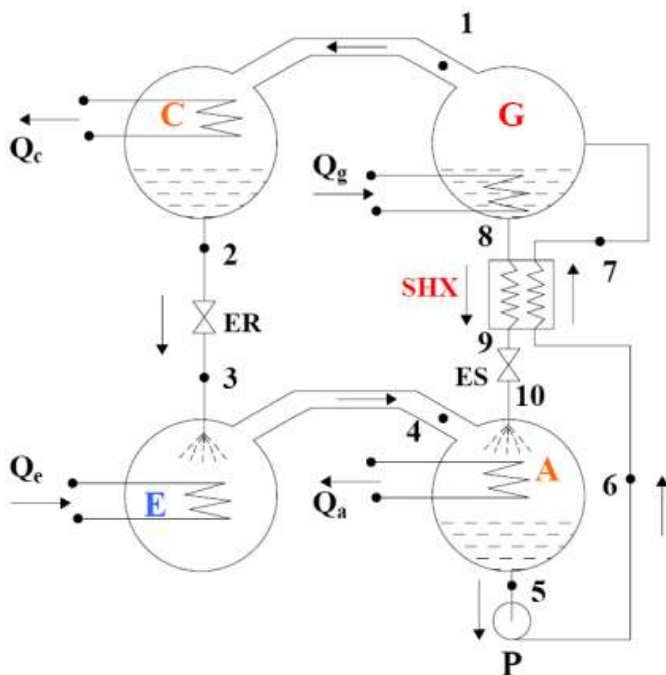
Pagal H. Lund et al [15], šildymui turėtų būti panaudojama vis daugiau žemo potencialo šilumos ir tam turėtų būti pasitelkiamos šilumos siurblio technologijos.

Pagrindinis AŠS skirtumas nuo kompresorinio, tai kad AŠS turi ne mechaninį, o termocheminį kompresorių. Termocheminį AŠS kompresorių sudaro du šilumokaičiai, generatorius ir absorberis, kuriuose palaikoma skirtinga temperatūra. Generatoriuje ir absorberyje turime binarinį (susidedantį iš dviejų komponentų) tirpalą, sudarytą iš absorbento ir šaldymo agento. Visais kitais atžvilgiais AŠS iš principo nesiskiria nuo kompresorinio (16).

AŠS atvirkštinam ciklui realizuoti naudojama ne elektros energija, o aukšto potencialo šiluma (APŠ). APŠ neša šilumnešis, kuriuo gali būti degimo produktai, garas ar vanduo. AŠS generatoriuje APŠ išgarina vandenį – lakesnį darbinio mišinio elementą. Darbinis mišinys susideda iš agento (vandens) ir absorbento (ličio bromido ar amoniako).

AŠS generatoriuje vyksta darbinio skysčio atskyrimas, išgaruoja vanduo. 13 pav. iš generatoriaus vandens garai tekinami į kondensatorių (1), kuriame kondensuojasi ir atiduoda šilumą (1-2). Paskui pratekėjus išsiplėtimo vožtuvą kondensato slėgis ir temperatūra ženkliai sumažėja (2-3). Toliau srautas nukreipiamas į garintuvą. Vandeniui paversti garu ir pakelti temperatūrai, sugerama žemo potencialo šiluma (3-4). Pašilę vandens garai absorberyje kontaktuojasi su ličio bromido lašeliais ir yra absorbuojami (4-10). Vyksta egzoterminė

absorbicija. Absorbicijos šiluma perduodama šildymo sistemos vandeniui. Binarinis mišinys siurbliu tiekiamas į generatoriaus aukštutinę dalį (5-6-7). Ciklas kartojamas.



13 pav. Absorbicinio šilumos siurblio principinė schema. A-absorberis, C-kondensatorius, E-garintuvas, G-generatorius, P-tirpalo siurblys, SHX-tirpalo šilumokaitis, ER-šaldymo agento (vandens) išsiplėtimo vožtuvas, ES- tirpalo išsiplėtimo vožtuvas

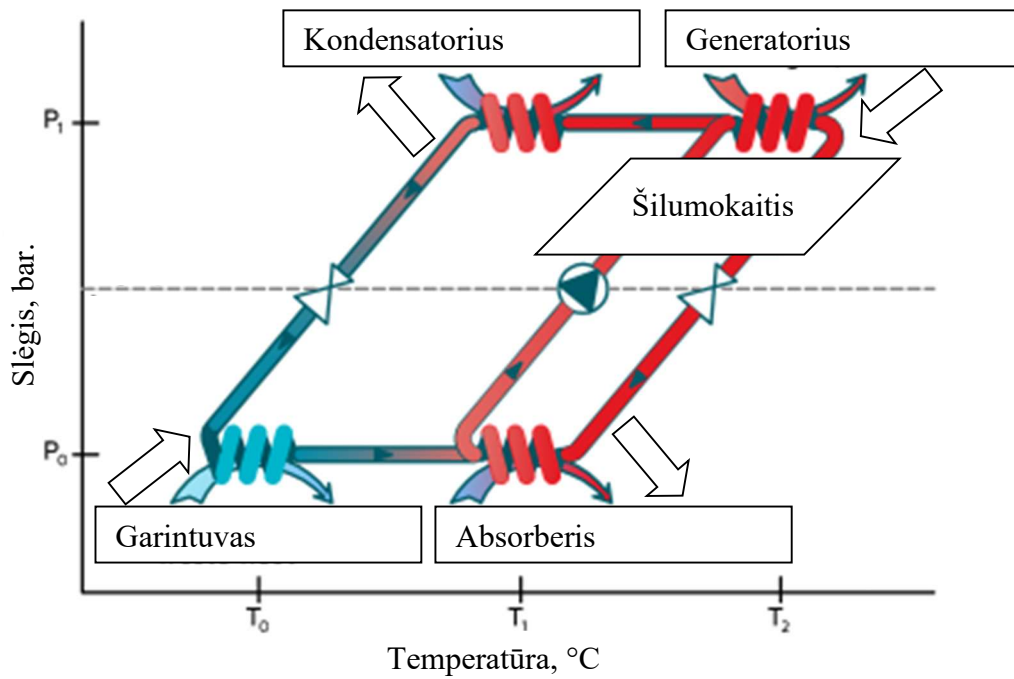
14 pav. pavaizduotas AŠS ciklas P-T (slėgio ir temperatūros) diagramoje. Iš diagramos matyti, kad AŠS turi dvi slėgio zonas: aukštą ir žemą. Slėgių skirtumą sukuria termocheminis siurblys sudarytas iš; absorberio, absorbento išsiplėtimo vožtuvo, tirpalo siurbliuko, šilumokaičio ir generatoriaus. Vienpakopiame kompresoriniame ŠS yra dvi temperatūros zonos. Dėl termocheminio siurblio, AŠS atsiranda trys arba keturios temperatūros zonos. Absorberio ir kondensatoriaus temperatūros gali būti vienodos arba skirtis.

Numatant AŠS biokuro katilinėje temperatūrų parinkimas yra vienas iš pagrindinių uždavinių. AŠS generatoriaus temperatūrą lems APŠ šaltinio temperatūra, t.y. vanduo iš katilo, dūmai po katilo arba kitas APŠ šaltinis.

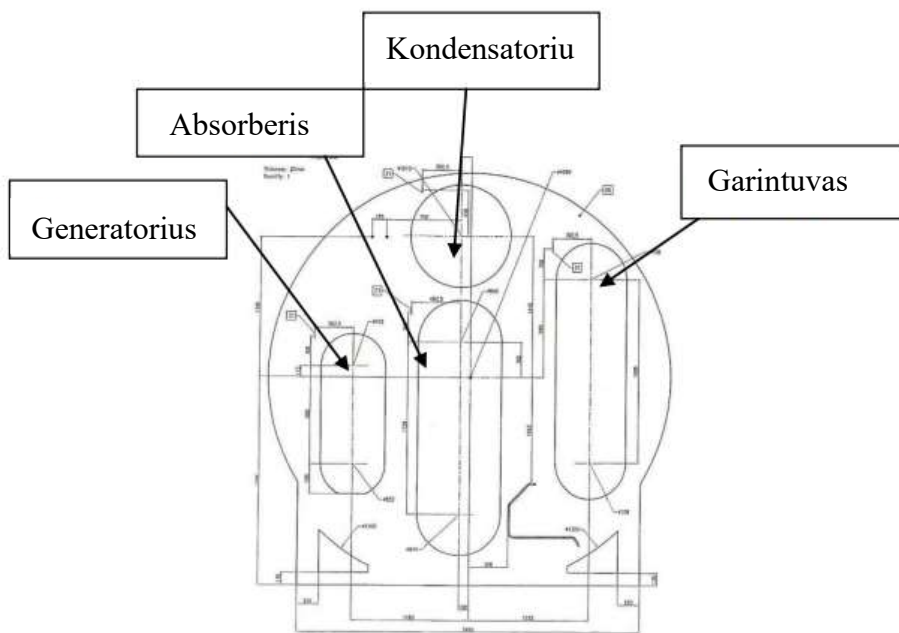
Absorberio ir kondensatoriaus temperatūra priklausys nuo termofikacinio vandens nuvedančio šilumą iš AŠS temperatūros. Biokuro katilinėje veikiančioje CŠT sistemoje šilumą iš AŠS gali nuvesti grįžtantis vanduo iš CŠT.

Kondensatoriaus temperatūrą lems dūmų ataušinimo gylis.

Tarp AŠS komponentų ir AŠS apiplaunančių srautų temperatūrų, dėl riboto šilumos mainų paviršiaus bus temperatūrų skirtumai.



14 pav. Absorbcinio šilumos siurblio veikimo schema P-T koordinatėse



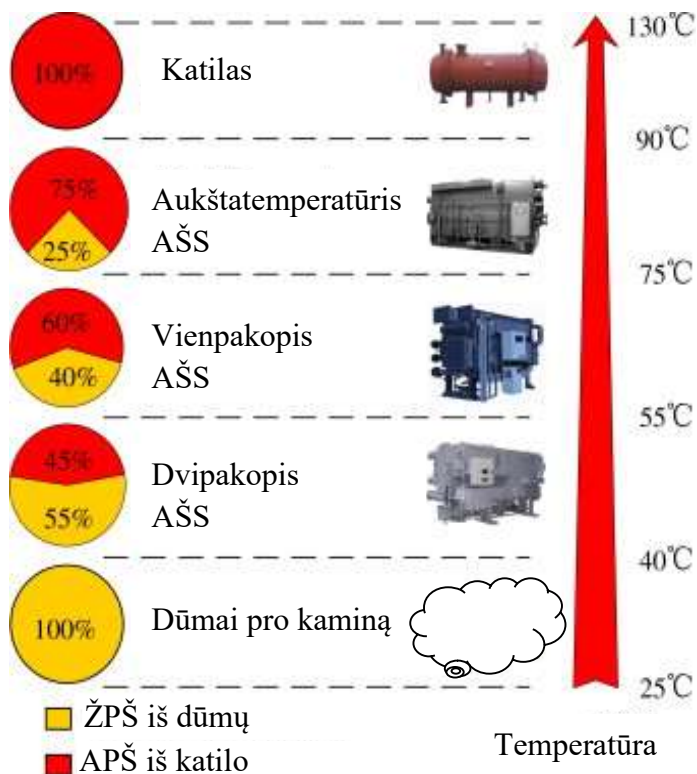
15 pav. Absorbcinio šilumos siurblio komponentų išsidėstymas

15 pav. pavaizduotas realaus AŠS brėžinys, vaizdas iš priekio. AŠS susideda iš keturių pagrindinių komponentų: generatoriaus, kondensatoriaus, garintuvo ir absorberio. Komponentai yra mechaniškai atskiri, su tarpais, kas sumažina nepageidaujamą šilumokaitį tarp komponentų. Kadangi įrenginyje aukščiausia temperatūra būna generatoriuje, o žemiausia garintuve, tai šios dalys laikomos toliau vienas nuo kitos. Kondensatorius įrengtas AŠS viršuje, nes garai iš generatoriaus laisvai kyla į viršų. O viršuje susidaręs kondensatas savo slėgiu ir stulpo slėgiu

užmaitina žemiau esantį garintuvą. Iš brėžinio matosi komponentų proporcijos. AŠS numatant biokuro katilinėje reikia įsitikinti ar pakaks laisvos vietos įrenginio sumontavimui ir eksploatavimui.

Absorbcinio šilumos siurblio tipo parinkimas pagal reikalingą atiduoti šilumos potencialą

Į AŠS generatorių numatoma tiekti APŠ iš katilo. Garintuvas gautų ŽPŠ iš dūmų. Kondensatorius ir absorberis pašildytą termofikacinį vandenį po KE.

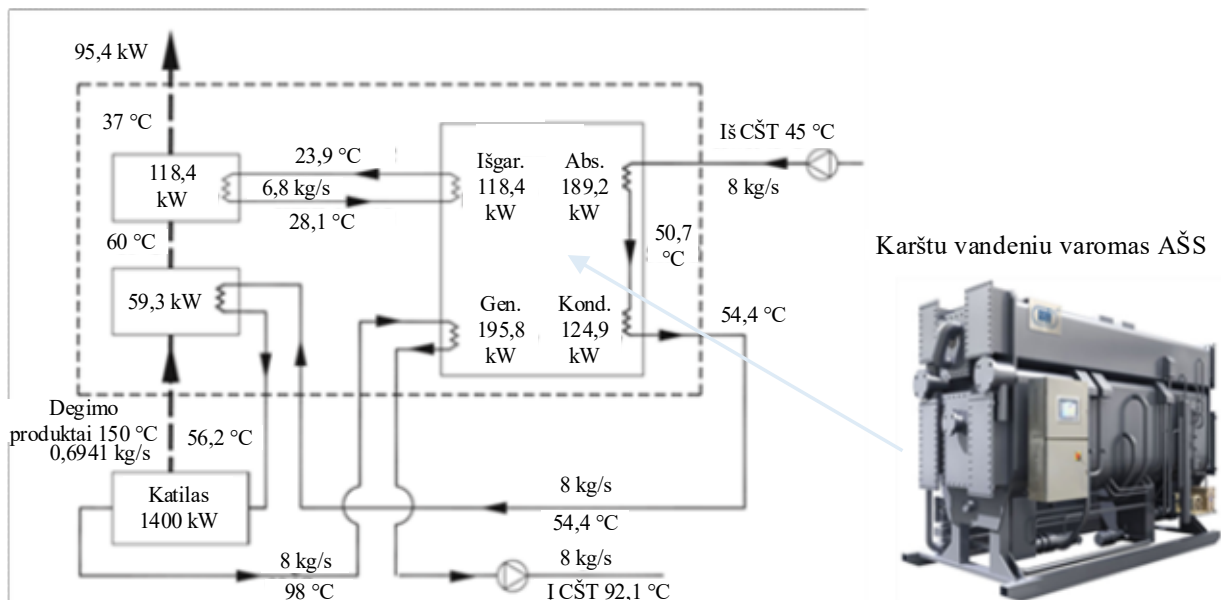


16 pav. AŠS tipo parinkimas pagal reikalingą atiduoti šilumos temperatūrą

Kadangi grįžtantis termofikacinis vanduo iš CŠT 40 – 60 °C pirmiausia pašildomas apie +5 °C KE ir po to planuojamas šildyti su APŠ, tai toliau nagrinėjamas 16 pav. pavaizduotas tarpinis vienpakopis AŠS.

Absorbcinio šilumos siurblio parinkimas pagal varomosios šilumos šilumnešį

Karštu vandeniu varomas AŠS ir jo jungimo schema katilinėje pavaizduota 17 pav. Lyginant su kitais, karštu vandeniu varomas AŠS gali būti nutolęs didžiausiu atstumu nuo varomosios šilumos šaltinio. Šilumos generatorių šilumokaičiai ir šilumos perdavimo vamzdynas gaminamai iš vienu medžiagų, o AŠS generatorių šilumokaičiai iš kitų. Todėl skiriasi vandens PH, kuriam esant korozija vyktų lėčiausiai. Termofikacinio vandens optimalų PH palaiko automatikos sistema.



17 pav. Karštu vandenius varomas absorbcinis šilumos siurblys ir jo jungimo schema katilinėje

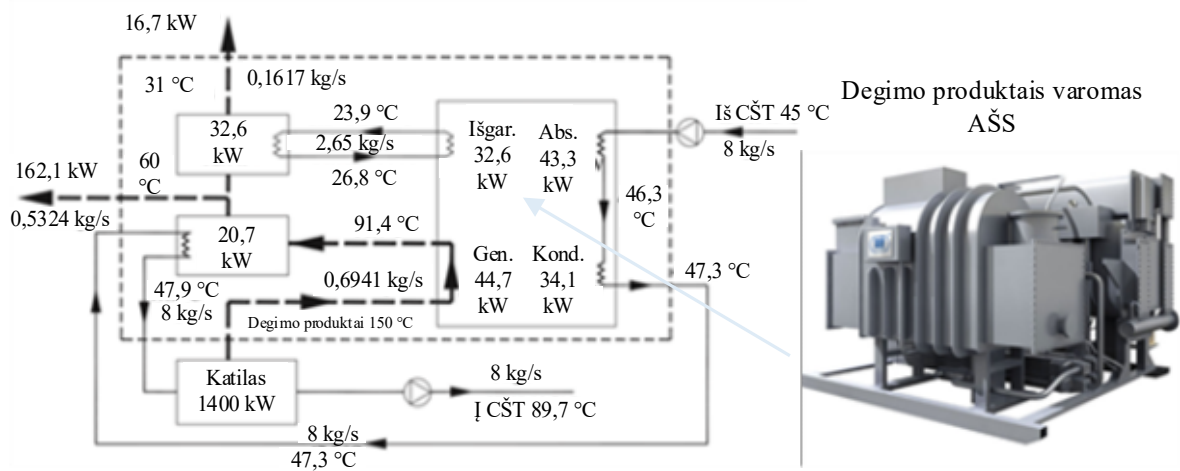
Svarstyti garu varomo AŠS 18 pav. integravimą biokuro katilinėje galima jei yra garo generatorius. Seniau katilinėse naudotas garo generatorius vandens deaeravimui, dabar retas įrenginys. Šiuolaikinėse katilinėse naudojamos pigesnės deaeravimo sistemos, nenaudojančios garo.

Garu varomas AŠS yra pigesnis nei karštu vandeniu varomas AŠS. Bet garo šiluma yra brangesnė nei karšto vandens.



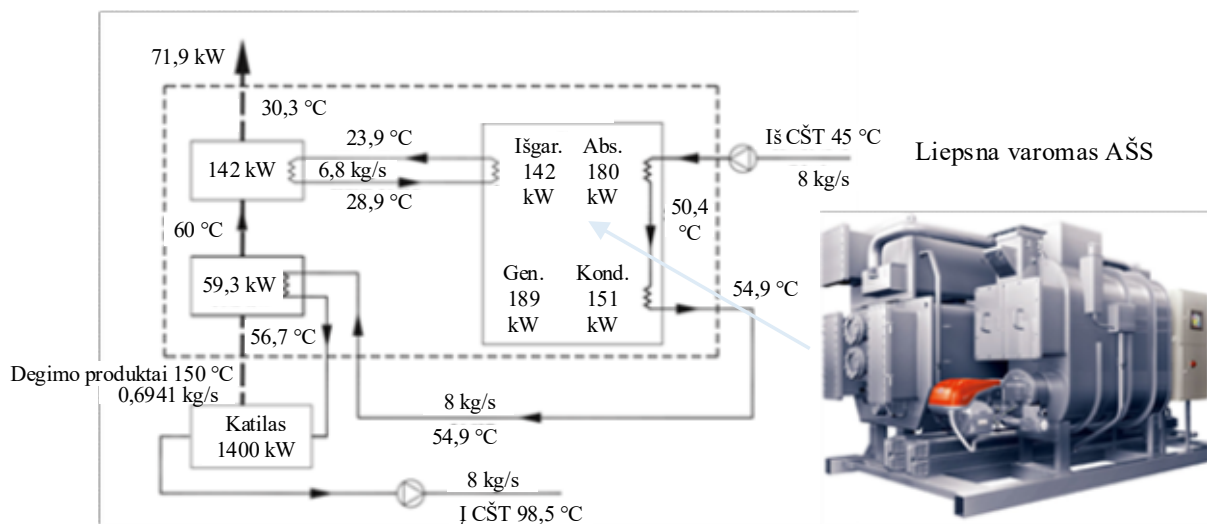
18 pav. Garu varomas absorbcinis šilumos siurblys

Degimo produktais varomas AŠS ir jo jungimo schema pavaizduota 19 pav.. Degimo produktai tiekiami po katilo, pratekėję multiciklonus, temperatūra 150-200 °C. Komplektuojami šalia biokuro katilo, kad būtų kuo trumpesnis degimo produktų kelias. Degimo produktais varomas AŠS yra brangesnis nei karštu vandeniu varomas AŠS. Degimo produktais varomas AŠS biokuro katilinėje būtų išeitis, kai iš katilo į AŠS generatorių tiekiamas nepakankamos temperatūros vanduo.



19 pav. Degimo produktais varomas absorbcinis šilumos siurblys ir jo jungimo schema katilinėje

Liepsna varomas AŠS ir jo jungimo schema katilinėje pavaizduota 20 pav. Jeigu biokuro katilinė yra dujojofikuota, galima vertinti liepsna varomus AŠS su dujiniais degikliais. Lietuvoje iš gamtinių dujų generuota šiluma būna brangesnė, nei iš biokuro. Brangesnė šiluma iš gamtinių dujų, blogintų liepsna varomo AŠS ekonominius rodiklius.



20 pav. Liepsna varomas absorbcinis šilumos siurblys ir jo jungimo schema katilinėje

Kadangi šilumos siurblių ekonominį patrauklumą daugiausiai lemia aukšto potencialo energijos kainos santykis su iš šilumos siurblio gautos šilumos kaina, tai pirmenybė teikiama karštu vandeniu varomam AŠS, kur šis santykis 1:1. Degimo produktais varomas AŠS detaliau nenagrinėjamas, nes yra brangesnis nei karštu vandeniu varomas AŠS.

Parenkamasis skaičiavimas

Šiluma tiekama į AŠS generatorių ir kondensatorių. Šiluma iš AŠS nuvedama per absorberio – kondensatoriaus grandinę. Kondensatorius nuveda 44 % šilumos, o absorberis 56 %.

AŠS garintuve gaunama 70-75 %, nuo į generatorių įvestos šilumos. Tokiu atveju AŠS COP nuo 1,7 iki 1,75:

$$Q_{išg} = Q_{gen} \cdot 0.7 \div 0.75 \quad (9)$$

$$COP = \frac{Q_{gen} + Q_{išg}}{Q_{gen}} = \frac{Q_{gauta}}{Q_{gen}} = 1.7 \div 1.75 \quad (10)$$

Kad AŠS gabaritai (kaina) atitiktų galią, parenkant AŠS temperatūrų rinkinius rekomenduojama naudotis tokiomis taisyklėmis:

$$t_{išg,iš} \geq 4 \quad (11)$$

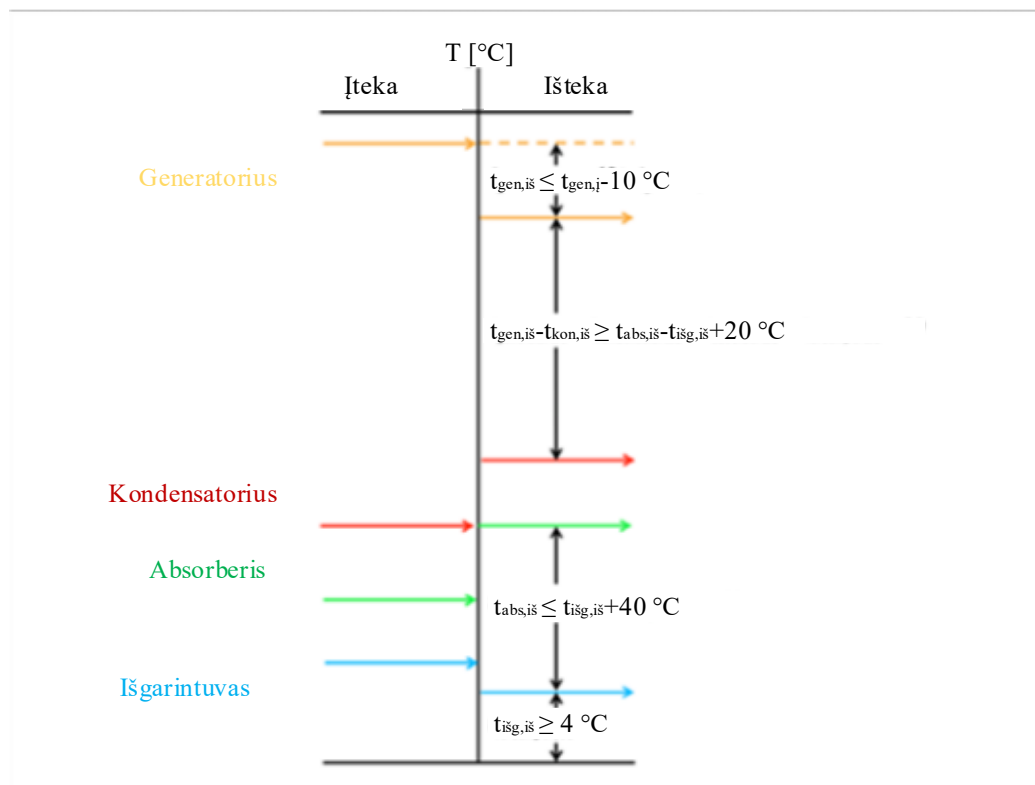
$$t_{abs,iš} \leq t_{išg,iš} + 40 \quad (12)$$

$$t_{gen,iš} - t_{kon,iš} \geq t_{abs,iš} - t_{išg,iš} + 20 \quad (13)$$

$$t_{gen,iš} \leq t_{gen,i} - 10 \quad (14)$$

$$t_{abs,iš} \leq t_{abs,i} + 0,56 \cdot (t_{kon,iš} - t_{abs,i}) \quad (15)$$

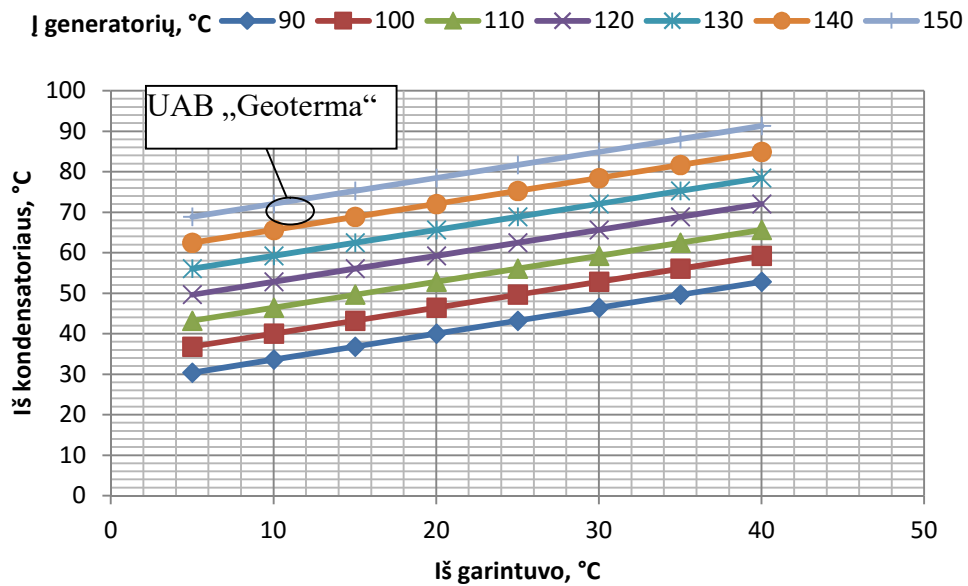
Taisyklės pateikus vizualiai:



Kuo iš garintuvo nuvestos šilumos temperatūra bus žemesnė, tuo giliau galima po kondensacinio ekonomizerio ataušinti degimo produktus ir iš jų paimti papildomą šilumos kiekį. Iš AŠS garintuvo gali išeiti mažiausiai $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūros vanduo, turi likti bent kelių laipsnių atsarga iki vandens užšalimo temperatūros.

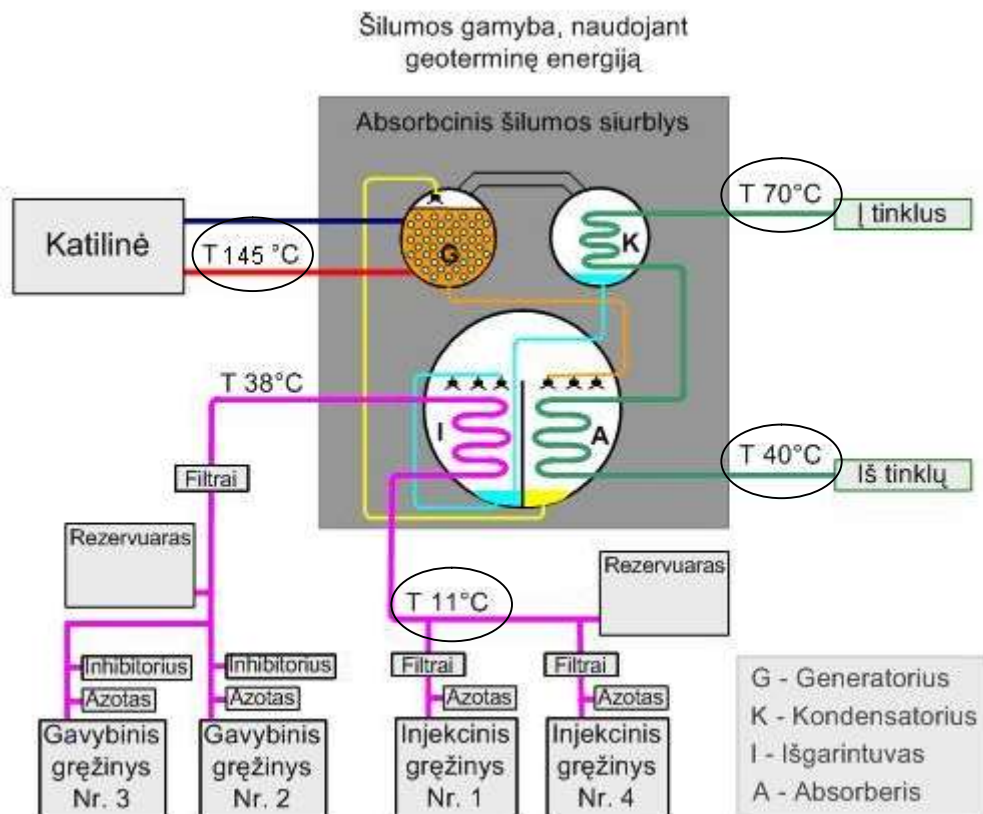
Tuo pačiu metu, kai AŠS veikia CŠT sistemoje reikia stengtis, kad iš AŠS kondensatoriaus ištekėtų kuo įmanoma aukštesnės temperatūros šilumnešis. AŠS kondensatoriaus išeinančio šilumnešio temperatūra:

$$t_{kon,iš} = \frac{t_{gen,i} - 30 - t_{išgar,iš} - t_{abs,i} \cdot 0,44}{1,56} \quad (16)$$

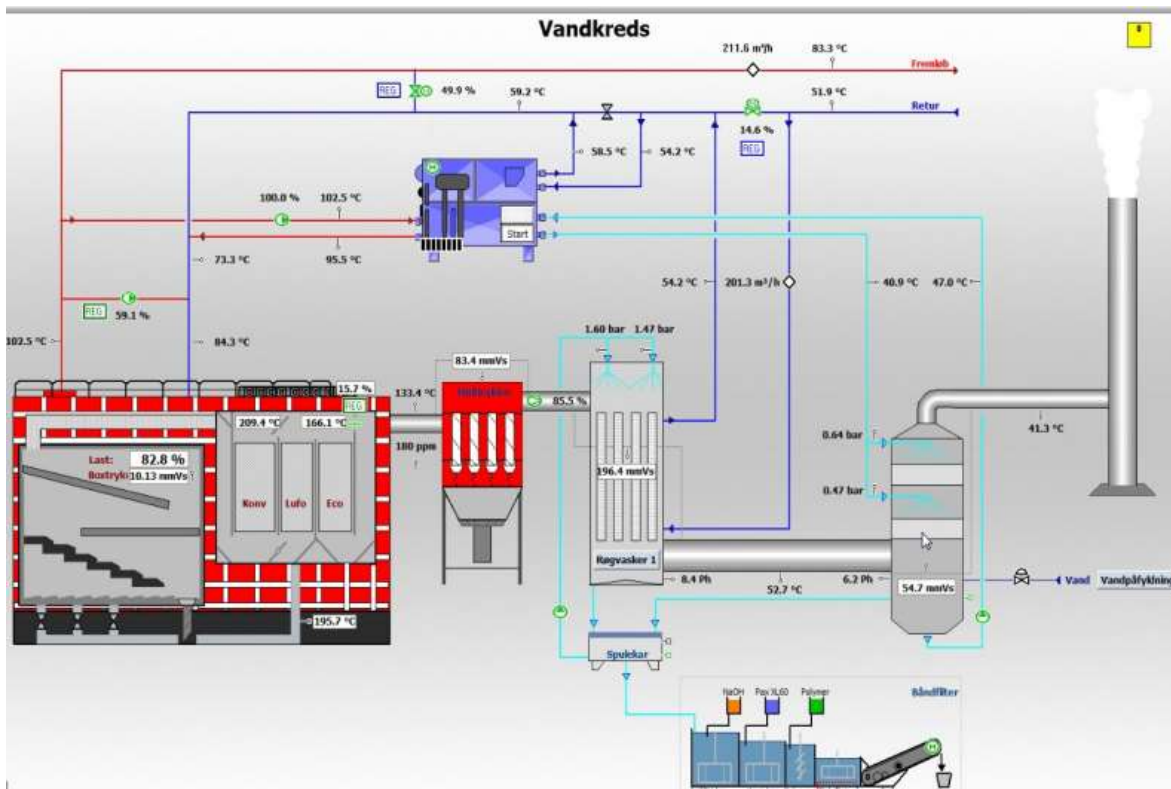


21 pav. AŠS komponentus apiplaunančių srautų temperatūrų sąryšis. Kai į absorberį paduodama 40 °C

Parenkamieji skaičiavimai beveik idealiai atitinka UAB „Geoterma“ AŠS 22 pav.



22 pav. UAB „Geoterma“ AŠS temperatūrų rinkiniai



23 pav. Danijas miesto Hillerød biokuro katilnēs su AŠS vandens kontūro schema

Danijas miesto Hillerød biokuro katilnēs 23 pav. AŠS apiplaunančīų srautų temperatūros skiriasi nuo rekomenduotīnų. Todēl būtina skaičiuoti AŠS COP ir įvertinti ar gautas dydis priimtinas.

Patikrinamasis AŠS naudingumo koeficiento skaičiavimas

Gali būti, kad AŠS numatant biokuro katilnėje, AŠS temperatūrų rinkiniai skirsis nuo rekomenduojamų, todėl būtina perskaičiuoti AŠS COP ir įvertinti ar gaunamas dydis priimtinas.

AŠS COP priklauso nuo vidinių garintuvo, kondensatoriaus, absorberio ir generatoriaus temperatūrų.

Skaičiuojamoji AŠS schema pavaizduota 13 pav.

Prielaidos:

- Ištirpus ličio bromido druskai vandenyje, padidėja virimo temperatūra.
- LiBr lyginant su vandeniu, yra ne lakus, todėl skaičiuojant galima numatyti, kad vandens garai AŠS yra grynai.

Masės balansas

Ličio bromido ir vandens tirpalo sudėtis išreiškiamas masinėmis dalimis. LiBr-H₂O tirpale, LiBr dalis tirpale (X) apskaičiuojama pagal formulę;

$$X = \frac{m_{LiBr}}{m_{LiBr} + m_v}; \quad (17)$$

m_{LiBr} – Ličio bromido masė tirpale, kg;

m_v – vandens masė tirpale, kg;

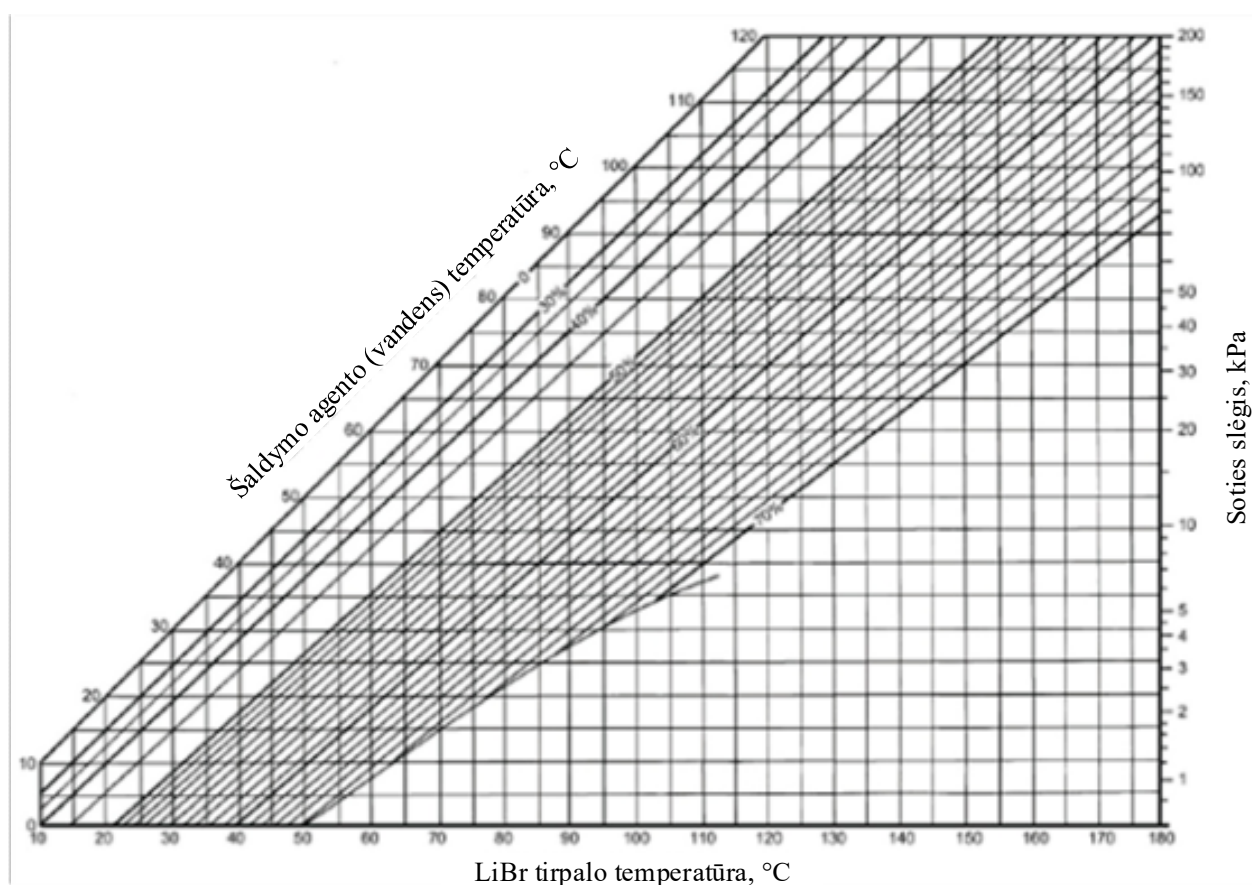
Vandens dalis tirpale;

$$X_v = X - 1; \quad (18)$$

LiBr-H₂O tirpalo koncentracija išreiškiama procentine LiBr koncentracija

Pusiausvyros diagrama

LiBr-H₂O vandens garų slėgio, temperatūros ir masinių dalių diagrama pateikiama 24 pav. Diagrama atitinka Duhring'o brėžinį, t. y. grafiškai pavaizduota gryno skysčio (x ašis) ir mišinio (y ašis) virimo temperatūros. Kiekviena linija žymi pastovią LiBr koncentraciją.



24 pav. Ličio bromido tirpalo pusiausvyros diagrama

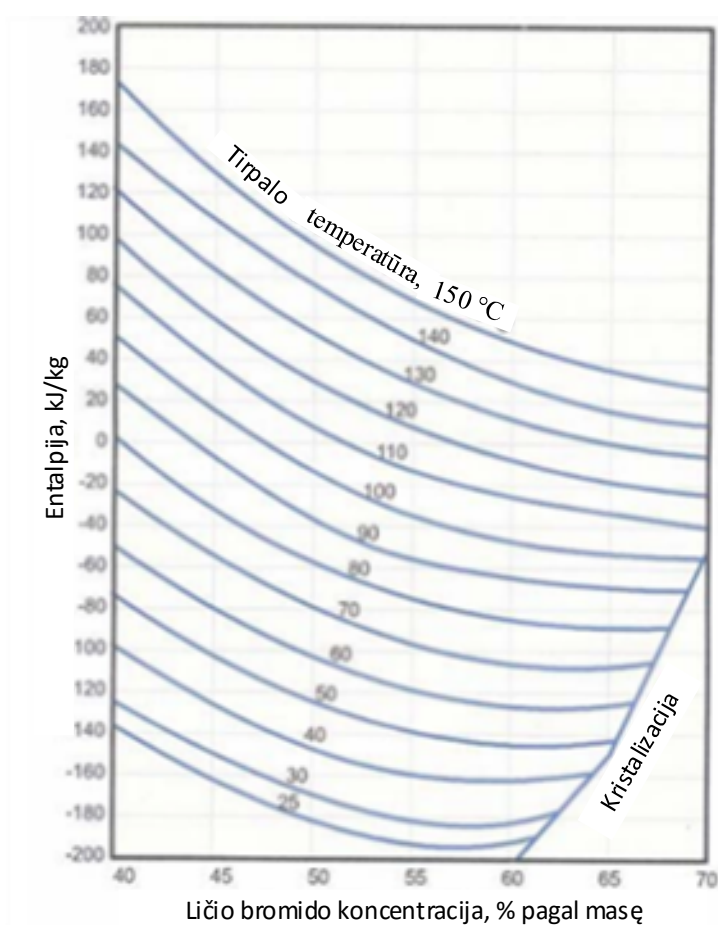
Entalpijos priklausomybė nuo koncentracijos

Adiabatiškai maišant gryną vandenį su grynu ličio bromidu, išsiskiria šiluma. Izoterminio maišymo atveju yra šalinama susidariusi šiluma. Izotermiškai sudarius tirpalą, galima rasti jo specifinę entalpiją iš 25 pav. Lenktos linijos gautos laikantis, kad vandens absorbcija vyko pastovioje temperatūroje. Absorbcijos metu LiBr koncentracija tirpale mažėja.

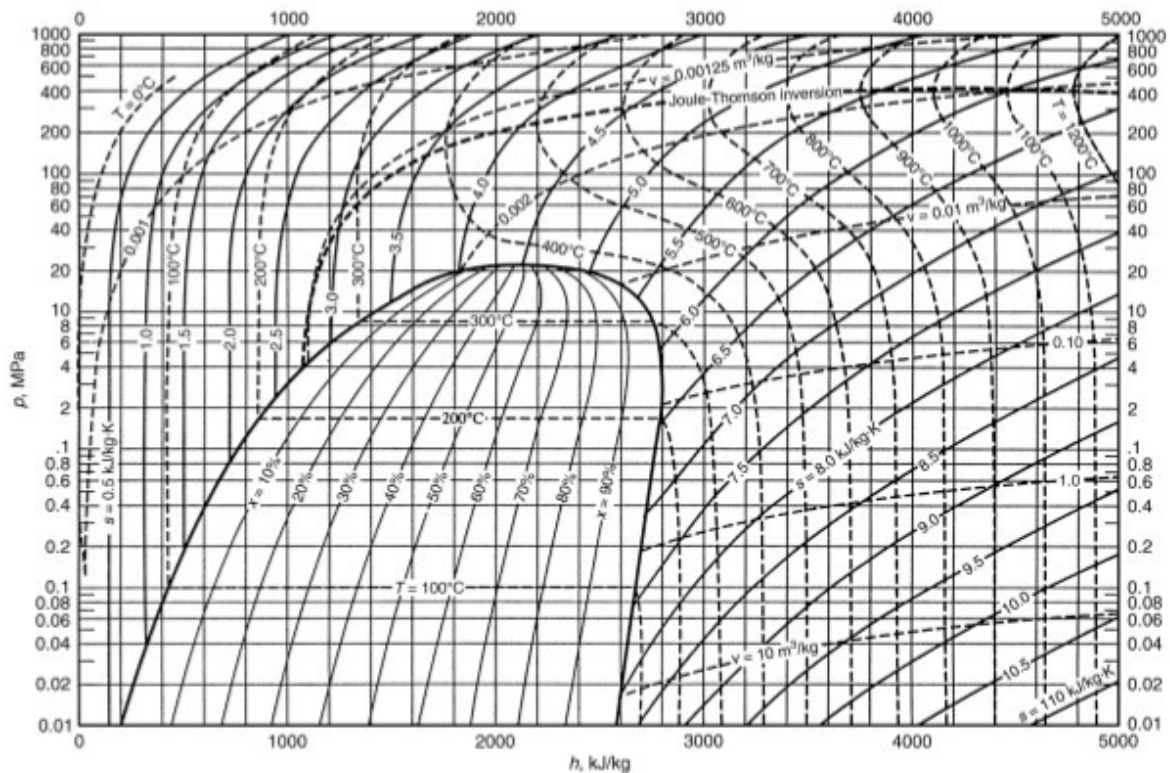
Kristalizacijos kreivė nurodo ribą, nuo kurios prasidėtų LiBr tirpalo kristalizacija. Kristalizacija vyksta prie šilumos mainų paviršiaus, susidaro porėtas mineralas – ceolitas, mažinantis šilumokaitą ir išderinantis AŠS.

Kristalizacijos prevencijai biokuro katilinėje reikia parinkti tokius AŠS kurie savyje turėtų nuolatinį LiBr koncentracijos matavimą.

Numatant AŠS biokuro katilinėje, reiktų užtikrinti, kad visą darbo laiką AŠS koponentuose būtų palaikomos projektinės temperatūrų ribos, neatsirastų kristalizacijos rizika.



25 pav. Ličio bromido tirpalo entalpijos priklausomybė nuo koncentracijos ir temperatūros



26 pav. Garo entalpijos nustatymas prie atitinkamo slėgio [19]

Šilumos ir masės balansas

AŠS duomenys;

Šaldymo galingumas (Dūmų ŽPS šaltinio galia)	3000 kW;
Temperatūra garintuvo viduje	5 °C;
Temperatūra kondensatoriaus viduje	50 °C;
Temperatūra absorberio viduje	40 °C;
Temperatūra generatoriaus viduje	110 °C;
Silpno tirpalo koncentracija	0,576;
Stipraus tirpalo koncentracija	0,66;
Šilumokaičio efektyvumas	1;
Tirpalo tankis	1200 kg/m ³ .

Sudaroma 4 lentelė, naudojantis 24 pav.25 pav. 26 pav.

4 lentelė. Skaičiuojamo AŠS taškų parametrai

Taškas	Temperatūra, °C	Slėgis, mbar	LiBr masės dalis tirpale X	Entalpija, kJ/kg
1	110	123,3	-	2708
2	50	123,3	-	209

3	5	8,72	-	209
4	5	8,72	-	2510
5	40	8,72	0,578	-154
6	40	123,3	0,578	-154
7	110	123,3	0,578	-37,5
8	110	123,3	0,66	-13
9	50	123,3	0,66	-146
10	50	8,72	0,66	-146

Vandens srautas per kondensatorių

$$m = \frac{Q_e}{h_4 - h_3} = \frac{3000 \text{ kW}}{2510 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 209 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 1,304 \frac{\text{kg}}{\text{s}}. \quad (19)$$

Cirkuliacijos santykis tarp stipraus tirpalo ir vandens:

$$\lambda = \frac{m_{ss}}{m} = \frac{X_{ws}}{X_{ss} - X_{ws}} = \frac{0,578}{0,66 - 0,578} = 7,05. \quad (20)$$

Stipraus tirpalo masinis debitas:

$$m_{ss} = \lambda \cdot m = 7,05 \cdot 1,304 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 9,193 \frac{\text{kg}}{\text{s}}. \quad (21)$$

Silpno tirpalo masinis debitas:

$$m_{ws} = (\lambda + 1) \cdot m = (7,05 + 1) \cdot 1,304 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 10,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (22)$$

Šilumos perdavimas AŠS komponentuose

Garintuvas:

$$Q_e = 3000 \text{ kW (priimta)}.$$

Absorberis:

$$Q_a = mh_4 + \lambda mh_{10} - (1 + \lambda)mh_5 = 1,304 \cdot 2510 + 7,05 \cdot 1,304 \cdot (-146) - (1 + 7,05) \cdot 1,304 \cdot (-154) = 3273 - 1342 + 1616 = 3547 \text{ kW}. \quad (23)$$

Generatorius:

$$Q_g = m \cdot h_1 + \lambda \cdot m \cdot h_8 - (1 + \lambda) \cdot m \cdot h_7 = 1,304 \cdot 2708 + 7,05 \cdot 1,304 \cdot (-13) - (1 + 7,05) \cdot 1,304 \cdot (-37,5) = 3531 - 1195 + 3936 = 3805 \text{ kW}. \quad (24)$$

Kondensatorius:

$$Q_c = m \cdot (h_1 - h_2) = 1,304 \cdot (2708 - 209) = 3259 \text{ kW}. \quad (25)$$

LiBr tirpalo cirkuliacinio siurbliuko galingumas:

$$W_p = \frac{(1+\lambda) \cdot m \cdot (P_c - P_e)}{\rho_{tarp} \cdot \eta_p} = \frac{(1+7.05) \cdot 1,304 \cdot (145\,000 - 750)}{1200 \cdot .8} = 1570 \text{ W}. \quad (26)$$

Šaldymo naudingumo koeficientas

$$COP_{šald} = \frac{Q_e}{Q_g} = \frac{3000}{3805} = 0.788 \quad (27)$$

Šildymo naudingumo koeficientas

$$COP_{šild} = \frac{Q_c + Q_a}{Q_g} = \frac{3259 + 3547}{3805} = 1.788 \quad (28)$$

Q_g – Generatoriaus varomoji šiluma, kW;

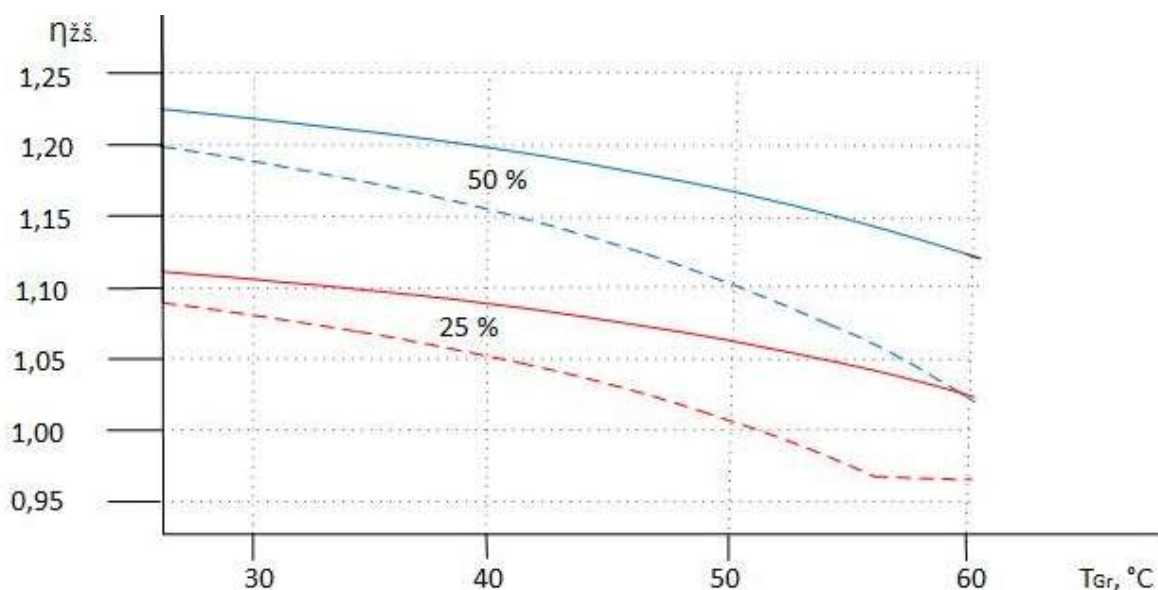
Q_c – kondensatoriaus atiduota šiluma, kW;

Q_e – Garintuvo paimta žemo potencialo šiluma, kW;

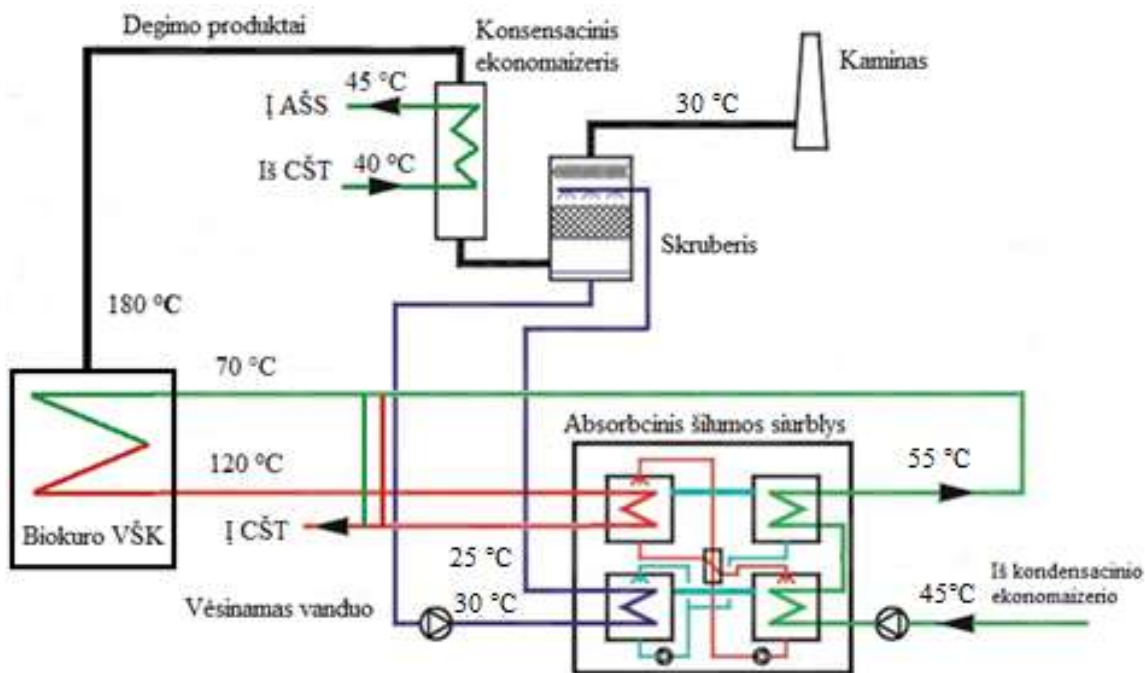
Q_a – Absorberio izobariškai atiduota absorbcijos proceso šiluma, kW.

AŠS integravimas biokuro katilinėje

Į biokuro katilinę integravus absorbcinį šilumos siurblių, dūmų temperatūra būtų apie 10 °C mažesnė, nei gražinamo termofikacinio vandens temperatūra, gilesnis dūmų aušinimas vykdomas AŠS šaldymo kontūru. Biokuro katilinėje tik su KE dūmai išeina 3 °C didesnės temperatūros nei grįžtantis termofikacinis vanduo iš CŠT. Iš 27 pav. matyti, kad daugiausiai efektyvumas padidėja, kai deginamas drėgnas kuras ir dūmus aušinantis KE vanduo būna santykinai aukštos temperatūros. Punktyrinės linijos lūžio taškas reiškia rasos tašką, nuo kurio prasideda dūmų drėgmės kondensacija.



27 pav. Biokuro katilinės efektyvumo priklausomybės nuo grįžtančiojo termofikato temperatūros ir kuro drėgnumo. Katilinė su KE (punktyras), su KE ir AŠS (ištisa). Oro pertekliaus koeficientas 1,5; oro temperatūra 0 °C.



28 pav. Biokuro katilinės su absorbciniu šilumos siurbliu principinė schema

Biokuro katilinės principinė schema su AŠS pavaizduota 28 pav. Grįžtantis termofikatas iš CŠT pirmiausiai pašildomas kondensaciniame ekonomizeryje, toliau patenka į AŠS. AŠS varančioji šiluminė energija yra VŠK termofikacinis vanduo, tiekiamas į AŠS generatorių. Toliau, atidavęs dalį šilumos AŠS, termofikacinis vanduo pagal temperatūrinį grafiką tiekiamas į CŠT.

Ekonomika

Paprastas atsipirkimo laikas - tai laikas, per kurį, įdiegus modernizaciją, sutaupymai padengia projekto investicijas, neįvertinus pinigų infliacijos. Skaičiuojama 1 instaliuoto šilumos MW atžvilgiu. Paprastas atsipirkimo laikas:

$$PAL = \frac{NI}{P-I-EI} \quad (29)$$

NI – nominalios investicijos į absorbcinį šilumos siurblių (5 lentelė), €;

P – AŠS generuotos pajamos iš atiduodamos šilumos, €/m;

I – išlaidos aukšto potencialo šilumai, skirtai varyti AŠS, €/m;

EI – eksploatacinės AŠS išlaidos (18 500 €/MW·m) [21], €/m;

$$I = (KN \cdot B_{kuro} + EIb) \cdot \frac{h}{COP} = \left(85 \frac{kg_{tne}}{MWh} \cdot 0,17 \frac{\epsilon}{kg_{tne}} + 5,4 \frac{\epsilon}{MWh} \right) \cdot \frac{8000 MW}{1,7 m} = 93 412 \frac{\epsilon}{m} \quad (30)$$

KN – vidutinė kuro norma, biokuro katilinės su KE - apie $85 \frac{kg_{tne}}{MWh}$;

B_{kuro} - biokuro kaina (apie 170 €/tne [23]), $\frac{\epsilon}{kg_{tne}}$;

EIb - Biokuro katilinės eksploatacinės išlaidos: 5,4 €/MWh [21];

h - 1 MW galios AŠS atiduotas šilumos kiekis per metus, MWh/m.

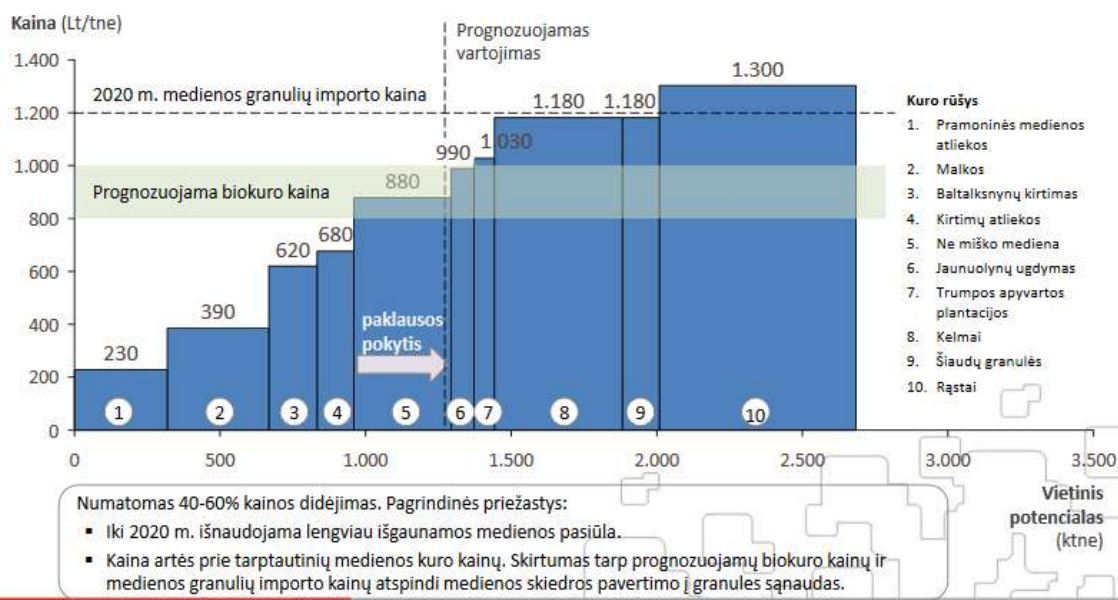
$$P = I \cdot COP = 93\,412 \frac{\text{€}}{\text{m}} \cdot 1,7 = 158\,800 \frac{\text{€}}{\text{m}} \quad (31)$$

Nominalūs vienpakopio AŠS instaliacijos investiciniai kaštai pateikti 5 lentelė. Kuo AŠS galingumas didesnis, tuo nominalios investicijos mažesnės. Lentelė galima naudotis, kai žemo potencialo šiluma pakeliama ne daugiau nei 50 °C. Žinant visus (29) formulės dydžius, randamas paprastas atsipirkimo laikas:

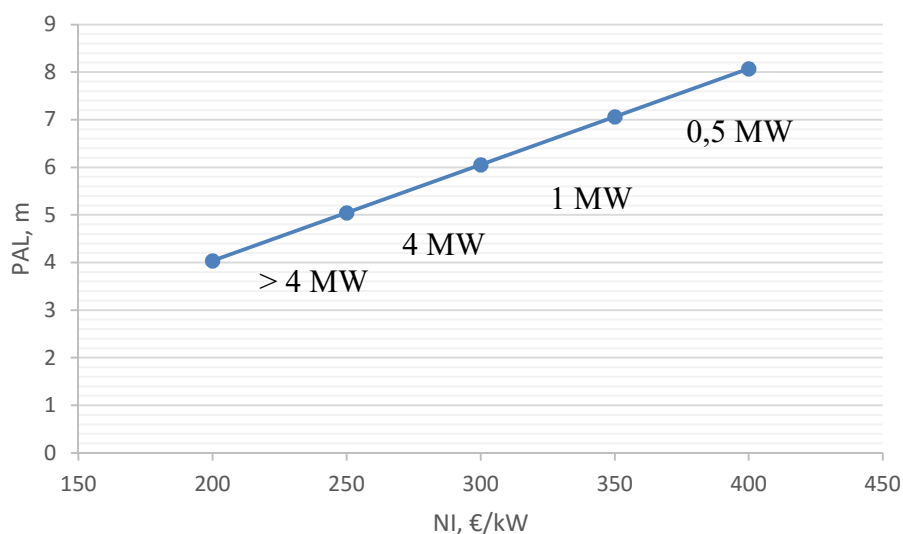
$$PAL = \frac{300\,000 \text{ €}}{158\,800 \frac{\text{€}}{\text{m}} - 9 \cdot 412 \frac{\text{€}}{\text{m}} - 18\,500 \frac{\text{€}}{\text{m}}} = 6,4 \text{ m} \quad (32)$$

5 lentelė. Orientaciniai AŠS investiciniai kaštai [22]

	Maksimali atiduodamos šilumos temp. °C	Maksimalus temp. perkrytis °C	COP	Instaliavimo kaštai 0,5 MW, (€/kW)	Instaliavimo kaštai 1 MW, (€/kW)	Instaliavimo kaštai 4 MW, (€/kW)
AŠS, (LiBr/H ₂ O)	100	50	1,7	340-390	300-350	250-290



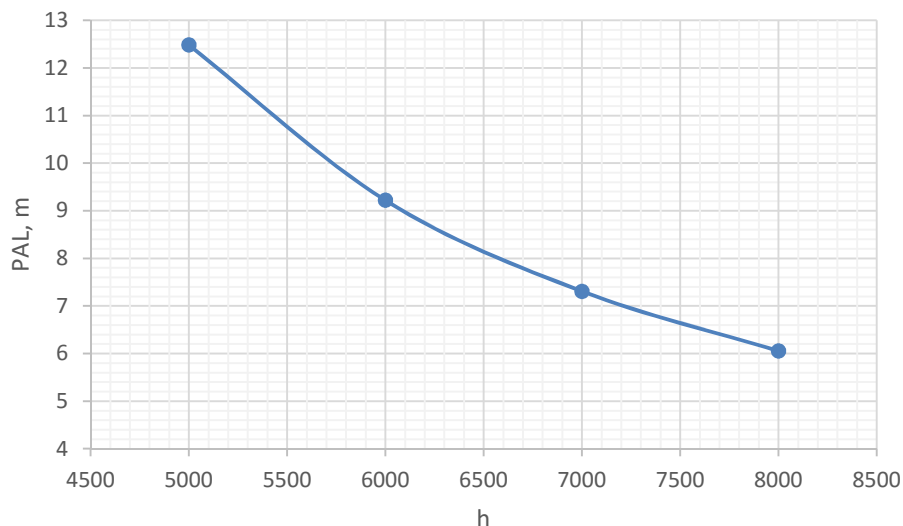
29 pav. Biokuro kainos prognozė 2021 m. [20]



30 pav. Nominalių investicijų į AŠS įdiegimą įtaka PAL

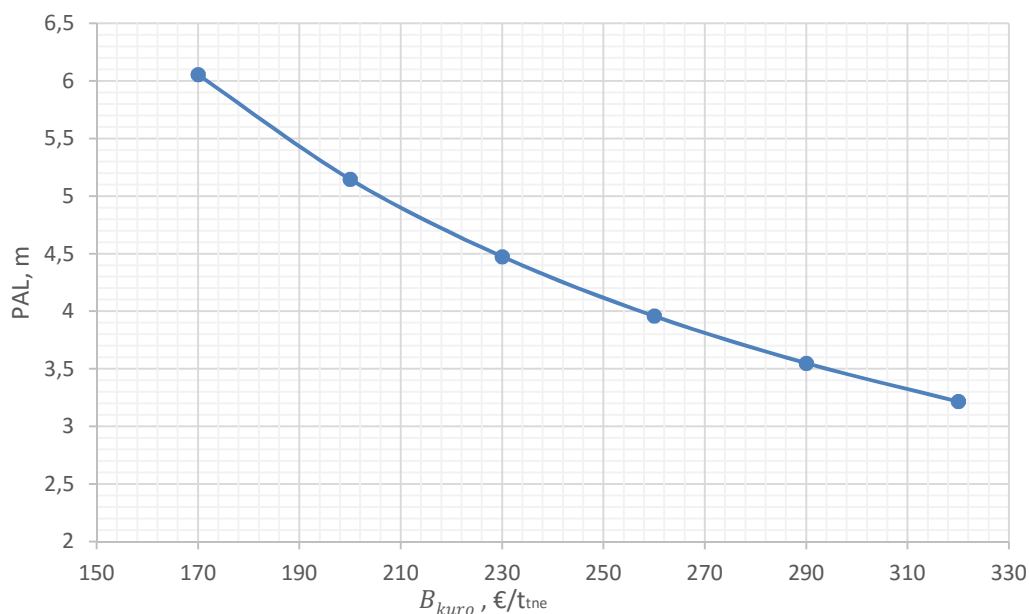
Didesnė galios ir mažesnio naudingumo katilinėse šalinama didesni šilumos kiekiai pro kamina. Prie didesnio ŽPŠ šaltinio galima statyti didesnės galios AŠS, kurio nominalios investicijos yra mažesnės. Masto ekonomika trumpina investicijos atsipirkimą 30 pav. .

Didžiausią įtaką atsipirkimui daro AŠS darbo valandų skaičius per metus 31 pav. Pirma AŠS reiktų planuoti tose biokuro vandens šildymo katilinėse, kurios dirba nominalia galia šildymo ir nešildymo sezono metu.



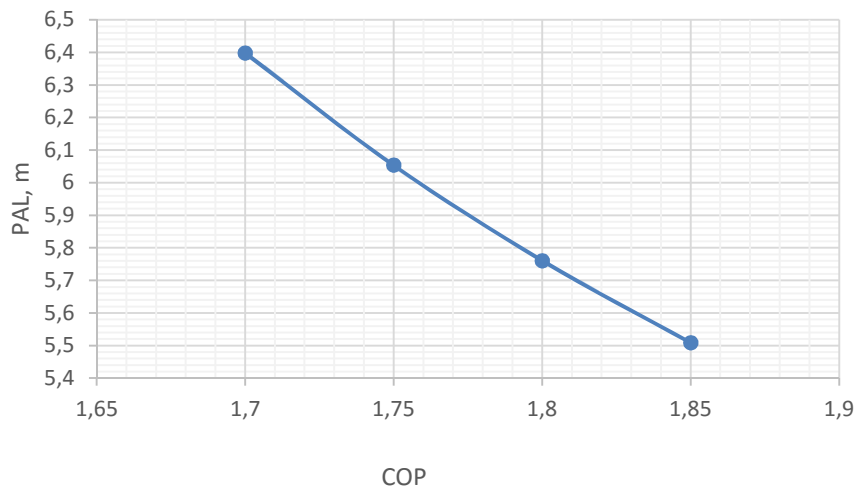
31 pav. AŠS įdiegimo PAL priklausomybė nuo darbo valandų skaičiaus per metus. Kai COP=1.75; $B_{kuro}=170 \text{ €/t}_{ne}$; NI=300 €/kW

Pagal 29 pav. prognozuojamas biokuro brangimas. 32 pav. pavaizduota kokią įtaką atsipirkimui daro biokuro kainą.



32 pav. AŠS įdiegimo PAL priklausomybė nuo kuro kainos. Kai COP=1.75; NI=300 €/kW; dirba 8000 h per metus

1 lentelė prognozuojama, kad AŠS COP didės. Vienpakopio AŠS COP artėja prie teorinio maksimumo $COP_{teo.maks}=2$. AŠS COP didėjimas trumpina atsipirkimo laiką 33 pav.



33 pav. PAL priklausomybė nuo AŠS tobulėjimo

Atsipirkimo laikas sutrumpėtų, gavus paramą, įvertinus pelną dėl papildomos šilumos pardavimo.

AŠS įdiegimo atsipirkimas ženkliai sumažėtų biokuro katilinėje konkuruojančioje CŠT sistemoje. Didesnis biokuro katilinės efektyvumas leistų pasiūlyti žemesnę šilumos kainą, nei konkurentas. Tai reiškia mažesnes katilinės prastovas. Pastovios šilumos gamybos sąnaudos pasidalintų ant didesnio šilumos kiekio.

Išvados

- Išnagrinėjus technologijas, šilumos nuostoliams pro kaminą mažinti, perspektyviausia priemonė pasirodė absorbcinis šilumos siurblys, turintis pranašumą, kai deginamas Lietuvos klimatinėms sąlygoms būdingas drėgnas biokuras.
- Atlikti tipinės biokuro katilinės modeliavimo rezultatai liudija, kad papildomai ataušinus dūmus, dėl sumažėjusio dūmų tūrinio debito, mažėja elektros energijos sąnaudos dūmų siurbimo ventiliatoriuose. Kartu papildomai elektros energijos suvartojama AŠS, tad susumavus poveikius, AŠS įdiegimas biokuro katilinėje nesudarytų ženklaus elektros energijos sąnaudų pokyčio.
- Dėl gilesnio dūmų ataušinimo išsikondensuoja daugiau drėgmės, kuri papildomai praskiedžia dūmus ir išgaudo kietąsias daleles. Tai patvirtina atlikta analizė su UAB „Fortum Klaipėda“ kietųjų dalelių koncentracijos dūmuose matavimais.
- Siekiant turėti katilinių projektavimui projektinę AŠS kainą ir COP, sudarytas AŠS temperatūrų rinkinių grafikas. Grafikas leidžia konkrečiu atveju rasti AŠS šaldymo kontūro temperatūrą, kuri lems dūmų ataušinimo gylį.
- Tipinėje katilinėje AŠS dūmus ataušintų apie 10 °C mažiau nei grįžtantis termofikacinis vanduo iš CŠT, tai padidintų biokuro katilinės šiluminį efektyvumą nuo 5 % iki 15 %. Didžiausias efektas pasiekiamas drėgną biokurą deginančioje katilinėje, veikiančioje CŠT sistemoje, kuriai būdinga aukšta grįžtančiojo termofikacinio vandens temperatūra.
- Įvertinus nominalių investicijų įtaka PAL, vien dėl masto ekonomikos AŠS atsipirkimo laikas biokuro katilinėje gali skirtis dvigubai.
- Dėl aukštos investicijų kainos, labai svarbus įrenginių panaudojamumo laipsnis. Pavyzdžiui, nominalia galia visus metus dirbančioje biokuro katilinėje AŠS investicija atsipirktų dvigubai greičiau, nei katilinėje dirbančioje tik šildymo sezonu.
- Atlikta jautrumo analizė rodo, kaip energetinio efektyvumo priemonės atsipirkimas priklausytų nuo biokuro kainos. Kadangi ateityje prognozuojamas biokuro kainų augimas ir didėja konkurencija Lietuvos šilumos ūkyje, tikėtina, kad energetinį efektyvumą didinančių priemonių tikslingumas ir paklausa reikšmingai didės.

Literatūra

1. Nacionalinė energetikos strategija. 2012. Prieiga per internetą: <<https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.E151BC09AE62>> [žiūrėta 2016-05-21].
2. Atsinaujinančių energijos šaltinių pasiskirstymas pagal rūšį Europos Sąjungos šalyse. 2013 m. Prieiga per internetą: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Share_of_renewables_in_gross_inland_energy_consumption_2013_%28%25%29_YB15.png [žiūrėta 2016-05-21].
3. AŠS panaudojimas labiau atšinti biokuro degimo produktus. Prieiga per Internetą: <<http://segenergy.dk/wp-content/uploads/Euro-Therm-AHP-111116.pdf>> [žiūrėta 2016-05-21].
4. AŠS panaudojimas biokuro katilinėje, ekonominė dalis 67 p. Prieiga per Internetą: <<http://docplayer.dk/3587845-Udnyttelse-af-roeggasenergi-med-varmepumper-v-aabenraa-og-roedekro-fjernvarme.html>> [žiūrėta 2016-05-21].
5. Danijos miesto Hjørring biokuro katilinė su AŠS. Prieiga per internetą. <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:clOfjn3iu14J:web.ornl.gov/sci/buildings/usnt/EHPS2015english/08_EHPS_2015_Hu_Haidong_V3fc.pdf+&cd=1&hl=lt&ct=clnk&gl=us&client=firefox-b> [žiūrėta 2016-05-21].
6. Biokuro katilų ir ekonomizaizerių techniniai, ekonominiai ir teisiniai aspektai. Prieiga per internetą: <<http://www.lsta.lt/files/seminarai/2012-03-20%20Radviliskis/R.Marmokas%202012m.%20konferencijai.pdf>> [žiūrėta 2016-05-21].
7. Reakcijų greitis. Prieiga per internetą: <https://en.wikipedia.org/wiki/Reaction_rate> [žiūrėta 2016-05-21].
8. Kuro taupymo galimybės pasitelkus automatinį kuro valdymą pagal O₂ ir CO matavimus. Prieiga per internetą: <<https://www.yumpu.com/lt/document/view/51111139/nr41-gruodis-lamtec/19>> [žiūrėta 2016-05-21].
9. Kūryklos su gazifikacijos dalimi prezentacija. Prieiga per internetą: http://www.dallenergy.com/media/150414_UBS_Kick_off_Summary.pdf [žiūrėta 2016-05-21].
10. Degimo oro drėkinimo technologijos pristatymas. Prieiga per internetą: http://www.scheuch.com/uploads/tx_cxbaseext/News/Scheuch_Folder_ERCS_E_02.pdf [žiūrėta 2016-05-21].
11. Oro gebėjimas įsisotinti vandens garais. Prieiga per internetą: <<http://docs.engineeringtoolbox.com/documents/281/air-moisture-holding-capacity-si.png>> [žiūrėta 2016-05-21].
12. KŠS ir AŠS palyginimas. Prieiga per internetą: http://www.geo-exchange.ca/fr/UserAttachments/flex405_Genevieve%20Gauthier.pdf [žiūrėta 2016-05-21].
13. Šilumos siurblių rodikliai. Prieiga per internetą; <<http://homes.et.aau.dk/mbb/fjernkulde/seminar130312/teknologikatalog.pdf>> [žiūrėta 2016-05-21].
14. 400 MW elektrinės dūmsiurbio elektros sąnaudos prie atitinkamų šalinamų dūmų temperatūrų, 5 paveikslas. Prieiga per Internetą: <http://www.mdpi.com/2071-1050/4/1/92/htm> [žiūrėta 2016-05-21].
15. Mokslinis straipsnis. Sumanaus CŠT tinklo integravimas į tvarias energetikos sistemas. Prieiga per internetą. <http://www.sdu.dk/en/Om_SDU/Institutter_centre/ITI/Forskning/Forskningspr>

- [ojekter/NATO_ARW/~media/241759A107EE412891CB60475441DD12.pdf](#)> [žiūrėta 2016-05-21].
16. AŠS aprašymas. Prieiga per internetą: <<https://hub.globalccsinstitute.com/publications/strategic-research-priorities-cross-cutting-technology/43-thermally-driven-heat-pumps>> [žiūrėta 2016-05-21].
 17. Valstybinis strateginis atliekų tvarkymo planas. 2002 m. Prieiga per internetą. <<https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.9945210D6571>> [žiūrėta 2016-05-21].
 18. Biokuro pelenai – technologiniai ir aplinkosauginiai aspektai. Prieiga per internetą: <http://www.lsta.lt/files/events/2014-11-04_05_Litbiomos%20konf/Sekcija%20B/2.%20Kestutis%20Buinevicius.%20Sekcija%20B.pdf> [žiūrėta 2016-05-21].
 19. Garo entalpijos nustatymo diagrama 20 p. Prieiga per internetą: <http://www.slideshare.net/jannap/engineering-thermodynamics-53791925>> [žiūrėta 2016-05-21].
 20. Biokuro kainos prognozė. Prieiga per internetą: http://www.lsta.lt/files/seminarai/Mokslo%20Akademijos%20seminarai/2015-10-29/04_Biokuro%20panaudojimas%20Lietuvos%20silumos%20ukyje.pdf
 21. Absorbicinio šilumos siurblio, dūmų šilumai paimti, eksploatacinės išlaidos, 20 psl. Prieiga per internetą: <https://www.energinet.dk/SiteCollectionDocuments/Danske%20dokumenter/Forskning/Technology_data_for_energy_plants.pdf> [žiūrėta 2016-03-10].
 22. Absorbicinio šilumos siurblio instaliavimo nominalios investicijos, 13 psl. Prieiga per internetą: <<http://www.leonardo-energy.org/sites/leonardo-energy/files/Cu0118%20-%20Industrial%20Heat%20Pumps%20-%20v2.pdf>> [žiūrėta 2016-03-10].
 23. Biokuro kaina. Prieiga per internetą: <<http://www.regula.lt/siluma/Puslapiai/kuro-ir-perkamos-silumos-kainos/vidutine-salies-kuro-zaliavos-kaina.aspx>> [žiūrėta 2016-03-10].
 24. Biokuro katilinės efektyvumo skaičiavimo metodika. Prieiga per internetą: <<http://www.bfe.admin.ch/php/modules/enet/streamfile.php?file=000000000374.pdf&name=000000190339>> [žiūrėta 2016-03-10]
 25. UAB „Fortum Klaipėda“ termofikacinės jėgainės emisijų mėnesinė ataskaita: 01.2016. Prieiga per internetą: <http://www.fortum.com/countries/lt/EmissionReports/kla_cems_month_201601.pdf> [žiūrėta 2016-03-10].