

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

Simas Biekša

BIOKURO JĖGAINĖS SU ŠILUMOS SIURBLIU ANALIZĖ

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas
Prof. dr. Vytautas Dagilis

KAUNAS, 2017

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

BIOKURO JĖGAINĖS SU ŠILUMOS SIURBLIU ANALIZĖ

Baigiamasis magistro projektas
Termoinžinerija (kodas 621E30001)

Vadovas

(parašas) Prof. dr. Vytautas Dagilis
(data)

Recenzentas

(parašas) Doc. Liutauras Vaitkus
(data)

Projektą atliko

(parašas) Simas Biekša
(data)

KAUNAS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Simas Biekša

(Studento vardas, pavardė)

Termoinžinerija, 621E30001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Biokuro jėgainės su šilumos siurbliu analizė“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. gegužės 23 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, Simo Biekšos, baigiamasis projektas tema „Biokuro jėgainės su šilumos siurbliu analizė“ 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)

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

Tvirtinu:

Šilumos ir atomo energetikos
katedros vedėjas

.....
(parašas, data)

doc. E. Puida

.....
(vardas, pavardė)

**MAGISTRANTŪROS UNIVERSITETINIŲ STUDIJŲ BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS
Studijų programa TERMOINŽINERIJA**

Magistrantūros studijų, kurias baigus įgyjamas magistro kvalifikacinis laipsnis, baigiamasis darbas yra mokslinio tiriamojo arba taikomojo pobūdžio darbas (projektas). Jam atlikti ir apginti skiriama 30 kreditų. Šiuo darbu studentas parodo, kad yra pagilinęs ir papildęs pagrindinėse studijose įgytas žinias, turi pakankamai gebėjimų formuluoti ir spręsti aktualią problemą, turėdamas ribotą ir (arba) prieštaringą informaciją, geba savarankiškai atlikti mokslinius ar taikomuosius tyrimus ir tinkamai interpretuoti duomenis. Taip pat jis parodo, kad yra kūrybingas, geba taikyti fundamentines mokslo žinias, išmano socialinės bei komercinės aplinkos, teisės aktų ir finansines galimybes, turi informacijos šaltinių paieškos ir kvalifikuotos jų analizės, skaičiuojamųjų metodų ir specializuotos programinės įrangos bei bendrosios paskirties informacinių technologijų naudojimo, taisyklingos kalbos vartosenos įgūdžių, geba tinkamai formuluoti išvadas.

1. Darbo tema: biokuro jėgainės su šilumos siurbliu analizė. Analysis of Biofuel Plant with Heat Pump

Patvirtinta 2017 m. balandžio mėn. 21 d. dekanų įsakymu Nr. V25-11-8

2. Darbo tikslas: įvertinti galimybes integruoti šilumos siurblių į biokuro kogeneracinę jėgainę. Atlikti palyginamuosius termodinامينius ir ekonominius skaičiavimus.

3. Darbo struktūra: darbą sudaro įvadas, kogeneracijos technologijų apžvalga, išsami dabartinės elektros rinkos apžvalga, šilumos transformavimo įrenginių pranašumai, efektyvumo didinimo galimybės, biokuro kogeneracinės jėgainės su ir be šilumos siurblio termodinaminis bei ekonominis įvertinimas ir palyginimas, išvados, literatūros sąrašas.

4. Reikalavimai ir sąlygos: darbas turi atitikti baigiamajam bakalauro darbui keliamus reikalavimus; Turi būti atliktas laikantis Lietuvos Respublikos normatyvinių reikalavimų. Papildomi duomenys skaičiavimams surinkti atliekant duomenų analizę.

5. Užbaigto darbo pateikimo terminas: 2017 m. gegužės mėn. 23 d.

6. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamajo darbo dalis.

Išduota studentui Simui Biekšai

Užduotį gavau

.....
(studento vardas, pavardė)

.....2017-02-02

(parašas) (data)

Vadovas

.....
(pareigos, vardas, pavardė)

.....2017-02-02

(parašas) (data)

Biekša, Simas. Biokuro jėgainės su šilumos siurbliu analizė. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Vytautas Dagilis; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: Energijos inžinerija

Reikšminiai žodžiai: *kogeneracija, biokuras, slaptoji garavimo šiluma, šilumos siurblys*

Kaunas, 2017. 53 p.

SANTRAUKA

Lietuva po Ignalinos atominės elektrinės sustabdymo, energetinio saugumo atžvilgiu žengė žingsnį atgal. Ne tik spaudimas iš Europos sąjungos didinti AEI panaudojimą, bet ir padidėjusi priklausomybė nuo elektros energijos bei gamtinių dujų importo, atitinkamas institucijas privertė ieškoti greito sprendimo. Intuityvi išėitis norint spręsti abi problemas buvo kogeneracijos skatinimas ir plėtra.

Lietuva pakankamai greitai įsisavino ištobulėjusias biokuro deginimo technologijas. Iš pradžių biokuras buvo naudojamas vandens šildymui ir garo tiekimui technologiniams procesams. Tačiau netrukus pasaulinė praktika jį naudoti elektros gamybai kogeneracinėse jėgainėse išsišaknijo ir Lietuvoje. Dabar tokios jėgainės energijos gamybos savikaina yra labai konkurencinga, tad norint įsitraukti į rinką reikia ieškoti efektyvumo didinimo galimybių.

Darbe nagrinėjami du skirtingi šilumos siurblio integravimo į įprastinę biokuro kogeneracinę jėgainę būdai. Viename šilumos siurblys naudojamas transformuoti visai vandens garo ciklo atliekinei šilumai, kitame – papildomam dūmų po kondensacinio ekonomizerio atvėsimumi ir didesniai slaptosios garavimo šilumos išnaudojimui.

Atlikti detalūs termodinaminiai bei ekonominiai skaičiavimai parodė, kad pirmasis variantas dėl itin galingo kompresoriaus ir didelio elektros energijos suvartojimo sumažina kasmetinį pelną. Tačiau kur kas kuklesnis šilumos kiekis yra dūmuose už ekonomizerio. Šilumos siurblys skirtas jiems atvėsinti ir įsisavinti besikondensuojančių vandens garų šilumai yra daug kartų mažesnės galios. Taip yra dėl didelio transformacijos koeficiento ($COP=9.899$), kuris įmanomas turint mažą temperatūrų skirtumą tarp žemo potencialo šilumos šaltinio ir šilumos siurblio kondensatoriaus kondensacijos temperatūros. Toks kompresorinis šilumos siurblys nereikalauja didelių investicinių kaštų ir kasmetinį pelną padidina 246 tūkst. € arba 13,5 %.

Biekša, Simas. Analysis of Biofuel Plant with Heat Pump: Master's thesis / supervisor assoc. prof. Vytautas Dagilis. The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Research area and field: Energy Engineering

Key words: cogeneration, biofuel, latent heat recovery, heat pump.

Kaunas, 2017. 53 p.

SUMMARY

After shutting down the Ignalina atomic power plant, Lithuania have received a huge blow to it's national energetic safety. Not only pressure from The European Union, but risen electricity and natural gas import dependency has forced Lithuania to search for a quick solution. Intuitive way to solve both of the problems was combined heat and power promotion and development.

Lithuania was very quick to master the sophisticated biofuel burning technologies. At the beginning biofuel was used for water heating and steam supply to various technological processes. Not long after, international experience using biofuel for cogeneration has rooted down in Lithuania too. Nowadays these plants energy production prime cost is particularly cheap. To hop into the market it is necessary to find effectiveness increasing capabilities.

In this study two different ways of heat pump integration into a regular biofuel CHP are examined. First one is based on full waste heat energy transformation of water steam cycle, second – additional flue gas cooling after the economizer and greater latent heat recovery.

Detailed termodinamic and economic calculations have shown that because of very high compressor power and it's electricity consumption the first version heat pump actually lessens annual profit. A lot less heat quantity is in the flue gas after the economizer. Heat pump designed to cool them down and gather condensing water vapour heat is many times less powerful. This is because of high coefficient of performance ($COP=9.899$), which is only possible when having low temperature difference between low grade heat pool and heat pump condensator condensing temperature. This kind of heat pump does not require high investment costs and increases annual profit by 264 thousand € or 13,5 %.

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	7
LENTELIŲ SĄRAŠAS.....	8
IVADAS	9
1. DARBO ESMĖ IR PROBLEMOS ANALIZĖ.....	11
1.1 Kogeneracijos technologijų apžvalga.....	11
1.1.1 Kogeneracijos pranašumai	11
1.1.2 Įprastinė biokuro kogeneracinė jėgainė	13
1.2 Kogeneracijos Lietuvoje apžvalga, jos vieta energetinėje strategijoje	14
1.2.1 Ekonominė ir technologinė apžvalga	14
1.2.2 Elektros energijos gamybos ir importo balansas.....	16
1.2.3 Elektros kaina.....	17
1.2.4 Viešuosius interesus atitinkančios paslaugos (VIAP).....	19
1.2.5 Energetikos ministerijos tikslai ir strategija.....	20
1.3 Šilumos transformavimas ir mokslinės literatūros apžvalga.....	21
1.4 Efektyvumo didinimo analizė ir galimybės	26
2. KOGENERACINĖS JĖGAINĖS GALIMŲ VARIANTŲ TERMODINAMINĖ ANALIZĖ 29	
2.1 Įprastinė biokuro kogeneracinė jėgainė.....	29
2.2 Biokuro kogeneracinė jėgainė su šilumos siurbliu.....	33
2.3 Biokuro kogeneracinė jėgainė su šilumos siurbliu papildomam šilumos atgavimui iš dūmų	38
3. EKONOMINĖ ANALIZĖ.....	41
3.1 Įprastinė biokuro kogeneracinė jėgainė.....	41
3.2 Biokuro kogeneracinė jėgainė su šilumos siurbliu.....	42
3.3 Biokuro kogeneracinė jėgainė su šilumos siurbliu papildomam šilumos atgavimui iš dūmų	46
3.4 Ekonominės analizės apibendrinimas ir rezultatų palyginimas	49
IŠVADOS	50
LITERATŪROS SĄRAŠAS	51

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Kogeneracijos pranašumas	11
2 pav. Biokuro kogeneracinės jėgainės schema	13
3 pav. Lietuvos elektros energijos balansas 2008-2014, TWH.....	14
4 pav. Elektros gamybos išteklių 2013 m.	14
5 pav. Pirminės energijos išteklių dalis Lietuvoje 2013 m.....	15
6 pav. “NordPool” biržos žemėlapis	16
7 pav. Elektros kainos sudėtis Lietuvoje	17
8 pav. Kogeneracinės jėgainės schema su dviejų pakopų suspaudimo šilumos siurbliu	22
9 pav. Kogeneracinės jėgainės principinė schema	29
10 pav. Kogeneracinės jėgainės Renkino ciklas.....	29
11 pav. Šilumingumo santykis tarp sausos ir šlapios medienos	31
12 pav. Atgautos šilumos priklausomybė nuo dūmų atvėsinimo laipsnio	32
13 pav. Įprastinės biokuro kogeneracinės jėgainės termodinaminės analizės schema.....	32
14 pav. Biokuro kogeneracinė jėgainė su šilumos siurbliu	33
15 pav. Šilumos siurblio įtaka garo ciklui	33
16 pav. Šilumos siurblio COP transformuojant visą ciklo atliekinę šilumą.....	37
17 pav. Šilumos siurblio papildomam dūmų ataušinimui schema	38
18 pav. KŠS ciklas nauojamas papildomai šilumai iš dūmų atgauti	40

LENTELIŲ SĄRAŠAS

Lentelė 1. „Eurostat“ duomenys apie kogeneraciją Lietuvoje 2006 – 2012 metais..... 15

Lentelė 2. Lietuvos nacionalinio elektros energijos gamybos ir vartojimo balanso duomenys

..... 16

Lentelė 3 Elektros kainos pardavimo tarifai biomasės jėgainėms Lietuvoje. 20

Lentelė 4. Ekonominių rodiklių suvestinė..... 49

IVADAS

Biomasė jau seniai naudojama energijai gauti. XVIII amžiuje tai buvo pagrindinis kuro, energijos šaltinis ir tik išsivysčius iškastinio kuro gavybos bei panaudojimo technologijoms jis buvo nukonkuruotas. Tačiau šiomis dienomis nemažėjant iškastinio kuro kasdieniam poreikiui, visuomenei vis labiau susifokusuojant ties aplinkosauga, kuro kainoms nepaliaujamai svyruojant dėl globalių atsargų kiekio, o taip pat ir politinių įvykių, tvarios alternatyvos paieška neišvengiama. Dėl politinio spaudimo ir ekonominių paskatų, ištobulėjus biokuro deginimo technologijoms, energetikoje iškastinis kuras stumiamas į šešėlį ir vis didesnę dalis visos energijos pagaminama naudojant būtent biokurą.

Pagrindiniai iškastiniu kuru pagaminamos energijos poreikiai yra šilumos ir elektros gamyba, kuras transportui. Kogeneracinė jėgainė gamina ir elektrą ir šilumą, o jos veikimo principas yra naudojamas kaip viena iš pagrindinių technologijų norint sumažinti aukščiausios energijos rūšies – elektros gamybos kainą. Iš 100% gautos energijos sudeginus kažkokį kiekį kuro, kogeneracijos cikle gauname 25 - 30% elektros energijos ir 55 – 60% šiluminės energijos. Nuostoliai sudaro tik apie 15 - 20%. Šiuo metu ši sritis sėkmingai plėtojama ir viena po kitos statomos kogeneracinės jėgainės. Norint įsitvirtinti energijos gamybos rinkoje, reikės su jomis konkuruoti.

2016 m. gruodžio 31d patvirtintas nedidelės galios biokuro kogeneracijos skatinimo aprašas įrodo naujojo Energetikos ministro Ž. Vaičiūno teiginių tvirtumą. Ne tik kadencijos pradžioje, bet ir dabar, įvairiose žiniasklaidos formose galime surasti jo pasisakymus ir reprezentuojamą poziciją, apie tolimesnę Lietuvos energetikos raidos viziją. Vietinės elektros gamyba yra vienas iš prioritetų norint didinti saugumą. Tai bus įgyvendinama skatinant vėjo ir saulės energetiką, bei jau minėtą biokuro kogeneraciją, kuri prisidėtų ir prie centralizuoto šilumos tiekimo naudojant AEI didinimo.

Šiai dienai turime įgyvendintus elektros jungčių projektus su Lenkija ir Švedija. Tarpsteminė jungtis Lietuva-Lenkija sujungia Baltijos šalių elektros energijos sistemą su Europos tinklais. Tai stipriai sumažina priklausomybę importui iš Rusijos. Nors dabar Lietuva vis dar priklauso BRELL šalių grupei ir tinklai yra valdomi iš Maskvos dispečerinės, ateityje „LitPol link“ bus naudojamas kitam dideliame ir labai svarbiame žingsniui elektros sektoriaus vystyme – sinchronizavimuisi su Europos elektros perdavimo asociacija. Tokia kaip niekad aktyvi elektros energijos sektoriaus situacija atveria kelią naujų ar anksčiau rinkai tuo metu netikusių idėjų įsisavinimui.

Šiame darbe bus studijuojami du skirtingi variantai į biokuro kogeneracinės jėgainės sistemą integruoti šilumos siurblio technologiją. Pirmuoju atveju keičiamas visas garo ciklas iš kogeneracinio į elektros gamybos. Garo išsiplėtimas iki aplinkos temperatūrą atitinkančio slėgio padidina elektros gamybos efektyvumą, o atliekinė šiluma, įprastai keliaujanti į aušinimo bokštą, gali būti naudojama išgarinti šilumos siurblio agentui. Elektra, reikalinga šilumos siurblio įrenginiams padėti pakelti žemo potencialo šilumnešio temperatūrą iki tokios, kad jį galėtume tiekti į CŠT, bus gaunama iš pačios jėgainės. Vietinės gamybos elektra yra apie du kartus pigesnė nei perkama iš tinklų. Antrajame variante dėmesys nukreipiamas į kogeneracinių jėgainių didžiausius nuostolius, kurie yra šiluma per karštus paviršius ir su išeinančiais dūmais. Šiuo atveju tiriama šilumos siurblio unikali savybė paversti dūmų po ekonomizerio šilumą tinkamą panaudojimui. Tiksliems termodinaminiam ciklų naudingumo koeficientams ir šilumos siurblio transformacijos koeficientams rasti pasitelkiama programa „CoolPack“.

Pažangiausių šiuolaikinių kogeneracijos ir šilumos siurblio technologijų bei ekonominių lengvatų, skiriamų jėgainėms, deginančioms biokurą, sujungimas į vieną projektą leistų gauti pigiausią energijos gamybos savikainą. Norint korektiškai įvertinti abiejų siūlomų projektų atsiperkamumą, atliekami detalūs termodinaminiai ir ekonominiai skaičiavimai.

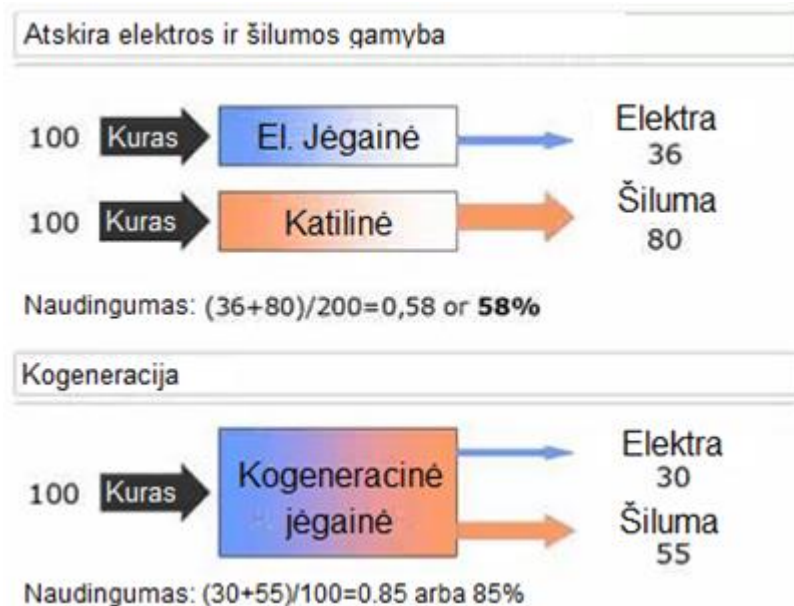
1. DARBO ESMĖ IR PROBLEMOS ANALIZĖ

1.1 Kogeneracijos technologijų apžvalga

1.1.1 Kogeneracijos pranašumai

Kylančios šilumos ir elektros kainos, labai kenksmingas poveikis aplinkai yra pagrindiniai faktoriai naujų, energiją taupančių technologijų plėtojimui. Aplinkosauginiai klausimai yra vieni iš svarbiausių statant naujas jėgaines ar renovuojant senąsias. Kylančios kuro kainos kompanijas priverčia pirkti įrangą su kuo didesniu naudingumo koeficientu, taip pat ir ieškoti galimybių sumažinti įvairius gamybos proceso energijos nuostolius, siekiant maksimalaus visos jėgainės naudingumo koeficiento.

Centralizuoto šilumos tiekimo (CŠT) sistemos dažnai laikomos geriausiu elektros energijos ir šilumos gamybos sprendimu šaltesnio klimato regionams. Jos lengvai optimizuojamos norint užtikrinti aukštą energijos gamybos ciklo efektyvumą, nuo kuro tiekimo logistikos, elektros ir šilumos gamybos, iki šilumos ir karšto vandens tiekimo į šilumos punktus. Be abejo, pats tinkamiausias variantas priklauso nuo individualios situacijos. Patenkinti šilumos ir elektros energijos poreikius yra daugybė būdų, galima kūrenti biokurą, naudoti žemės geoterminę ar saulės spindulių energiją, bet mažiausiai pastangų dideliems energijos kiekiams pagaminti reikalauja iškastinis kuras. Nepriklausomai nuo energijos gamybos principo ar kuro rūšies, visos įmonės siekia kiek įmanoma labiau sumažinti energijos nuostolius. Paprastai CŠT sistemos tobulinimas prasideda nuo senų katilinių renovacijos, kuri dažnai įgyvendinama rekonstruojant katilinę į kogeneracinę jėgainę gaminančią tiek šilumą, tiek elektrą.[1]



1 pav. Kogeneracijos pranašumas

Europoje ši technologija nebuvo itin paplitusi energetikoje. 1998 m. tokio tipo jėgainių instaliuota galia tesiekė 70 GW ir tik pastaraisiais metais vidutinės vienos jėgainės galia viršijo 10 MW. Tačiau Rytų Europoje, kur dažnai naudojama centralizuota šilumos tiekimo sistema, kogeneracinės jėgainės užima daug didesnę rinkos dalį. Europos Komisijos (EK) nustatytas tikslas buvo iki 2013 metų apie 20 % elektros energijos pagaminti kogeneracinėse jėgainėse. EK šią iniciatyvą rėmė finansinėmis paramomis.

Elektros gamyba kogeneracinėse jėgainėse yra efektyvus būdas sumažinti oro taršą. Pastaraisiais metais ypač susikoncentruota naudoti biomasę, biokurą ir kitą draugišką gamtai kurą kogeneracijos cikle, kaip alternatyvą įprastoms anglims ar naftos produktams.

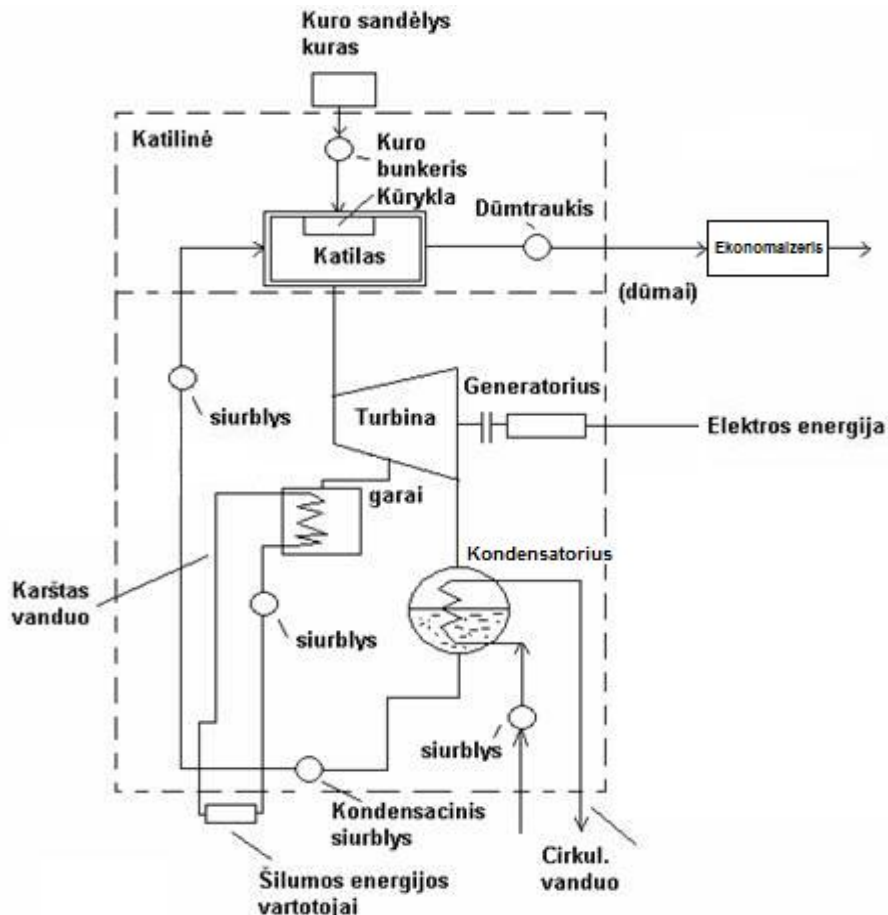
Europos Sąjungoje didžiausia katilinių dalis kūrenamų biokuru yra mažos ir vidutinės galios katilinės. Nuo 10 iki 150 MW. Šiose sistemose šilumos poreikiai vasarą sumažėja iki 3 – 15 MW. Kogeneraciniu režimu dirbančiose tokiose jėgainėse yra galimybė įrengti įvairios galios elektros generatorius – nuo vos kelių iki dešimčių megavatų. Atliktos analizės ir tyrimai parodė, kad kogeneracinės jėgainės ekonomiškai efektyvios tik tuomet, jeigu jos dirba beveik visus kalendorinius metus – t. y. ne mažiau 6 – 7 tūkstančių valandų. Taip pat norint įgyvendinti tokius projektus reikalingas pastovus šilumos poreikis, pakankami biomasės išteklių, esantys regione, jų pasiūla ir kaina. Medžio atliekų ir biomasės rinkoje vyrauja stipri konkurencija. Įmonės ruošia medžio plaušo, pjuvenų, skiedrų, celiuliozės ir popieriaus atliekų, neseniai atsirado medžio briketai, granulės. Šiek tiek mažesnė konkurencija tarp medžio atliekų ir specialiai biomasei auginamų augalų. Tikslingai pasirinktų tiekėjų biomasės transportavimo atstumas neturėtų viršyti daugiau nei 50 kilometrų.[2]

Apibendrinant galime išskirti šiuos biokuro kogeneracinės jėgainės privalumus:

- Pigesnė energija: deginant biokurą vienos megavatvalandės šilumos ar elektros pagaminimo savikaina yra mažesnė lyginant su iškastiniu kuru. Kuro kainą dar labiau galima sumažinti pradėjus deginti atliekas.
- Mažesni mokesčiai už kenksmingų medžiagų išmetimus: biokure nėra sieros, o kitų dalelių sugaudymas ir pelenų pašalinimas paprastai būna labai efektyvus.
- Biokuro kogeneracinėms jėgainėms skiriamos finansinės paramos, specialios kvotos.
- Išugdyta technologija: biomasę deginama jau seniai, kogeneracijos technologija taip pat įsitvirtinusi. Šiuolaikinė modernizacija leidžia automatizuoti jėgainės eksploatavimą. Sumažėjusios agregatų eksploataavimo elektros sąnaudos.[3]

1.1.2 Įprastinė biokuro kogeneracinė jėgainė

Kuras tokioje jėgainėje pristatomas į sandėlį iš kurio tiekiamas į bunkerį, o iš jo į kūryklą. Sudegusio kuro dujos išeina per dūmtraukį, kuriame įrengiamas ventiliatorius garantuojantis dujų pašalinimą, kintant atmosferos slėgiui. Garai iš katilo tiekiami į turbiną, o išėję iš jos aušinami kondensatoriuje, naudojant vandenį iš cirkuliacinio siurblio. Dalis išeinančio garo nukreipiamas į šilumokaitį, kuriame yra vamzdynas su cirkuliuojančiu termofikaciniu vandeniu. Šis vanduo tiekiamas šiluminės energijos vartotojams. Kondensatą siurblys tiekia į maitinimo baką, iš kurio siurblys vėl jį tiekia į katilą. Turbina su generatoriumi sudaro atskirą bloką – bene brangiausią ir sudėtingiausią jėgainės įrenginį. Dažniausiai montuojami keli tokie įrenginiai. Generatoriaus išėjime yra skirstomieji įrenginiai ir aukštinantysis transformatorius, kuris tiekia elektros energiją į elektros perdavimo linijas EPL. Vartotojai maitinami iš skirstomųjų įrenginių, o stambūs pramoniniai vartotojai gali turėti savus generavimo, perdavimo ir skirstomuosius įrenginius.[4]

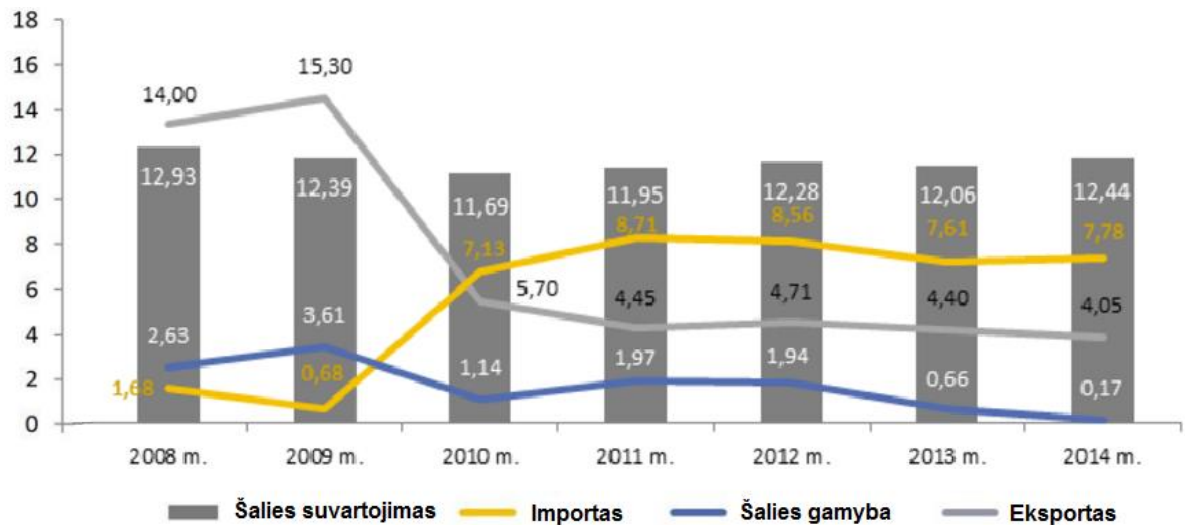


2 pav. Biokuro kogeneracinės jėgainės schema

1.2 Kogeneracijos Lietuvoje apžvalga, jos vieta energetinėje strategijoje

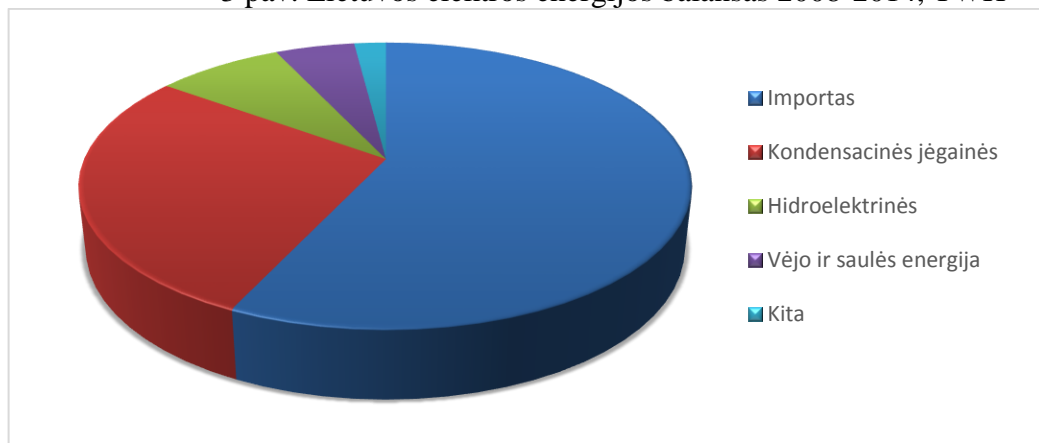
1.2.1 Ekonominė ir technologinė apžvalga

Daugiau nei 50 % elektros, gaminamos panaudojant šilumą, Lietuvoje yra pagaminama naudojant kogeneracines jėgaines. Po Ignalinos atominės elektrinės uždarymo stipriai krito vietinės elektros gamyba. Lietuvai nespėjus atitinkamai pasiruošti tuomet beliko kūrėti senąsias, gamtinėmis dujomis kūrenamas, termofikacines elektrines su garo turbinomis. Kadangi dujos buvo importuojamos, o elektros generatoriai jau pergyvenę savo aukso amžių, elektros energijos kainos šovė į viršų. Ne gana to prarasta atominės elektrinės generuojama galia buvo tokia didelė jog elektros energijos importas siekė net 70 % [5].



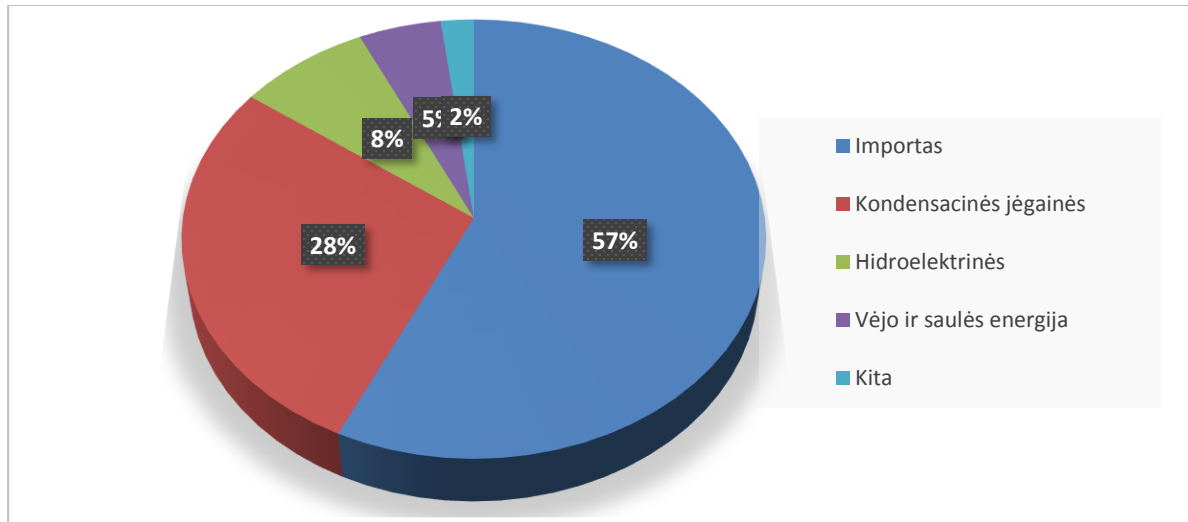
xa

3 pav. Lietuvos elektros energijos balansas 2008-2014, TWH



4 pav. Elektros gamybos išteklių 2013 m.

Pagrindinis pirminės energijos šaltinis yra naftos produktai, kurie sudaro 36 % dalį. 31 % sudaro gamtinės dujos, o 2013 metais atsinaujinančių energijos šaltinių auganti dalis pasiekė 21 % visos pirminės energijos.



5 pav. Pirminės energijos išteklių dalis Lietuvoje 2013 m.

Uždarius Ignalinos atominę elektrinę sumažėjo elektros energijos gamyba, to pasekoje kogeneracinių jėgainių pagaminamas procentinis elektros kiekis stipriai išaugo ir pasiekė net 36% visos pagaminamos elektros. Po staigaus kogeneracijos augimo 2004 metais, šių jėgainių pagaminamas elektros kiekis Lietuvoje svyravo apie 1.9 TWh, o instaliuota galia lėtai augo iki 1.2 GWe.

Lentelė 1. „Eurostat“ duomenys apie kogeneraciją Lietuvoje 2006 – 2012 metais.

CHP	Instaliuota elektrinė galia, GW	Pagamintos šilumos kiekis, TWh	Pagamintos elektros kiekis, TWh	Visos Lietuvoje pagamintos elektros dalis, %
2006	1.04	5.53	1.78	14.3
2007	1.05	4.69	1.84	13.2
2008	1.08	4.22	1.77	12.7
2009	1.09	4.59	2.14	13.9
2010	1.10	5.37	1.99	34.6
2011	1.21	4.40	1.81	37.5
2012	1.17	4.28	1.82	36.2

Lietuvos Energetiniam saugumui kogeneracija buvo kaip gelbėjimosi ratas, kol politikai tapė „Liūtą“ už ūsų. Galiausiai naujosios atominės elektrinės projektas liko įšaldytas.

1.2.2 Elektros energijos gamybos ir importo balansas

Kaip visame pasaulyje taip ir Lietuvoje, atitinkamai 3,8 % ir 1,4 %, kasmetinis elektros energijos suvartojimas auga. 2016 metais nacionalinis elektros suvartojimas yra didžiausias nuo 2009 – ujų, kai elektra dar buvo pigi prieš uždarant Ignalinos AE, dėl įsipareigojimų stojant į Europos Sąjungą. Apie pusę visos elektros energijos pagamino atsinaujinančius energijos išteklius naudojančios elektrinės. Šiek tiek virš 1 TWh – hidroelektrinės, 0,8 TWh – vėjo elektrinės, 0,46 TWh – saulės energija, biomasė, biodujos ir atliekomis kūrenamos elektrinės.

2015 metais 66 % Lietuvoje suvartotos el. energijos buvo importuota. Didžioji dalis iš Latvijos, Estijos ir Šiaurės Europos valstybių (Skandinavijos). Likusioji – iš trečiųjų šalių. [6][7]

Lentelė 2. Lietuvos nacionalinio elektros energijos gamybos ir vartojimo balanso duomenys

TWh	2009m.	2015m.	2016m.
Elektros energijos gamyba		4,598	
Šiluminės elektrinės		2,321	
Hidroelektrinės		1,013	
Vėjo elektrinės		0,807	
Kiti atsinaujinantys energijos šaltiniai		0,459	
Importas		7,460	
Eksportas		0,253	
Bendras elektros energijos poreikis	12,39	11,806	11,960

Didžiąją dalį importuojamos elektros energijos šiuo metu perkame iš „NordPool“ operatorės administruojamos elektros biržos, kitas būdas pirkti elektros energiją yra pagal dvišalius kontraktus. „NordPool“ yra viena didžiausių iš septynių pagrindinių elektros biržų, veikiančių Europoje, kurios dėka yra užtikrinamos sąlygos konkurencijai, skaidrios kainos ir vienodos taisyklės rinkos dalyviams. Kainos biržoje yra nustatomos kas valandą arba „diena prieš“, naudojantis paklausos ir pasiūlos koreliacija. Elektros energijos pirkėjai siūlo už kiek brangiausiai jie galėtų nupirkti elektrą, o pardavėjai – už kiek pigiausiai galėtų ją parduoti. [8]

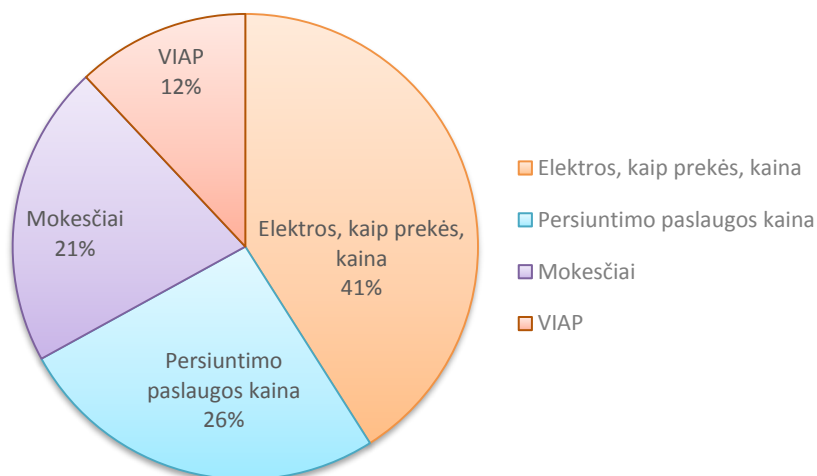


6 pav. “NordPool” biržos žemėlapis

1.2.3 Elektros kaina

Elektros kaina vartotojams ir jos kaina biržoje skiriasi kelis kartus. Ji susideda iš kelių pagrindinių dedamųjų, kurių kiekvieną būtų galima išskirstyti dar į dešimtis smulkesnių. Apskaičiavimas per daug metų keitėsi dėl įstatymų, elektros jungčių su užsieniu, energiją eksportuojančių šalių diktuojamų sąlygų. Panagrinėkime iš ko susideda elektros kaina ir nuo ko ji priklauso iš arčiau.

Elektros kaina susideda iš:



7 pav. Elektros kainos sudėtis Lietuvoje

Didžiausią kainos dalį (41 %) sudaro elektros įsigijimo iš gamintojų ir tiekėjų kaina. Elektra galima pirkti iš pasirinkto nepriklausomo elektros energijos tiekėjo arba iš visuomeninio tiekėjo, pvz., „ESO“. Pirmuoju atveju kaina priklausys nuo susitarimo su nepriklausomu tiekėju, antruoju – kainą nustato komisija. Visuomeninio tiekėjo elektros energijos kaina priklauso nuo jos pardavimo tarifo, vartotojų aptarnavimui reikalingų lėšų, sąskaitų išrašymo ir kt.

Šios kainos dedamoji taip pat yra balansavimo elektra. Elektra yra išskirtinis produktas, kadangi didelių jos kiekių negalima kaupti ar kitaip akumuliuoti, reikalingas balansavimas. Jei dėl avarijos, neplanuotai padidėjusio elektros suvartojimo ar kitų priežasčių, staiga nutrūksta elektros energijos tiekimas iš galingos elektrinės, ar per elektros jungtį su užsieniu, regione atsiranda elektros energijos trūkumas. Jį reikia kompensuoti perkant brangesnę elektra iš kitų regionų arba skubiai paleidžiant rezervinius elektros energijos gamybos ir tiekimo šaltinius [2017 metais Lietuvos elektrinė], iš kurių perkamos elektros kaina viršys rinkos kainą. Elektros energijos balansavimą reguliuoja perdavimo operatorius „LitGrid“. Elektros suvartojimas ir gamyba yra apibrėžti pagal iš anksto sudarytus

vartojimo ir gamybos grafikus. Jei viena ar kita pusė šių grafikų nesilaiko – naudojama balansavimo energija. Kiekvienas rinkos dalyvis su operatoriumi „LitGrid“ sudaro balansavimo energijos pirkimo pardavimo sutartis. Paprastai balansavimo energijos pirkimo, dėl jos didelės kainos, bandoma kiek įmanoma išvengti.

Ketvirtį galutinės kainos sudaro elektros energijos perdavimas. Aukštos įtampos (330, 110 kV) perdavimas vykdomas tolimais atstumais (AB „LitGrid“), skirstomaisiais vidutinės ir žemos įtampos (35-6 kV, 400 V) tinklais elektra perduodama galutiniam jos vartotojui t.y., „ESO“. Persiuntimo kaina nekinta – kasmet ji yra nustatoma kainų komisijos. Pati komisija nustato tik kainos viršutinės ribas, o visuomeniniai ar nepriklausomi tiekėjai – kainą, neviršijančią komisijos nustatytos. Taip pat verta paminėti, kad perdavimo kaina priklauso nuo kokios įtampos elektros energija yra perkama, kuo žemesnės – tuo ji brangesnė, nes reikia panaudoti daugiau įtampą žeminančių etapų. Sisteminės paslaugos taip pat yra įskaičiuojamos į šią perdavimo kainą. Sisteminės paslaugos yra elektros energijos tinklų sistemos patikimumo ir kokybės išlaikymas, t.y., dažnio, įtampos, elektros srautų palaikymas, greitas energijos trūkumo atstatymas. Už šias paslaugas atsakingi yra AB „LitGrid“.

Likusios elektros energijos tarifo sudedamosios yra viešuosius interesus atitinkančios paslaugos (VIAP) 12 % ir pridėtinės vertės mokestis 21 %.[9][10]

Elektros kainą veikia:

- Oro sąlygos
- Vandens lygis hidroelektrinėse (ne tik Lietuvos regione)
- Kuro kainos pasaulinėje rinkoje
- CO2 taršos leidimų kainos
- Padėtis pasaulio ekonomikoje
- Elektros energijos pasiūlos ir paklausos svyravimai

1.2.4 Viešuosius interesus atitinkančios paslaugos (VIAP)

Viešuosius interesus atitinkančios paslaugos (VIAP) yra mokestis taikomas elektros energijai. Jo dedamoji galutinėje elektros energijos kainoje yra apie 12 %. 2017 metais numatytas VIAP biudžetas siekia 145 mln. Eurų. Šie pinigai paskirstomi AEI rėmimui, sistemos rezervui, saugumui ir kitoms mažiau reikšmingoms sritims.

Didžioji dalis pinigų tenka atsinaujinančius energijos išteklius naudojančioms elektros energijos gamintojams. Be VIAP pagalbos kai kurie iš jų neišsilaikytų rinkoje, tačiau toks priverstinis brangesnės energijos pirkimas kyla iš Europos Sąjungos vykdomos politikos: 23 % visos Lietuvoje sunaudotos energijos iki 2020 m., turi būti pagaminta naudojant AEI. Iš šalies gali pasirodyti, jog toks brangesnės paslaugos rėmimas nėra suinteresuotas į mažiausią įmanomą kainą eiliniam vartotojui, juk ES neturi griežtų rėmų kaip reikia pasiekti tuos 23 %. Bet reikia nepamiršti jog yra taikomi ir kiti būdai šiam tikslui įgyvendinti: subsidijos, naujų pajėgumų investicinė parama, gamybos kvotų paskirstymas. Net ir pasiekus 2020 m., reikalaujamą ribą finansavimas šiai sričiai negali būti nutraukiamas, nes būtent dėka jo yra vykdoma vietinė elektros gamyba.

Kita torto dalis tenka tiekimo saugumo ir sistemos rezervo užtikrinimui. Lietuvos elektrinė, nors ir degina gamtines dujas, šiuo metu yra moderniausia ir efektyviausia elektros energijos gamintoja Lietuvoje, kuri santykinai greitai gali pagaminti didelį jos kiekį. Tačiau kuo toliau tuo labiau abejojama ar tikrai reikia tam skirti milijonus eurų. Pati frazė saugumas ir rezervas nėra tiksliai apibrėžta. Tai lyg draudimas, kuris garantuoja, kad susiklosčius kažkokioms nepalankioms aplinkybėms nebus didelių elektros energijos kainų šuolių. Lietuvai įleidus šaknis Europos elektros rinkoje mes visada turime keletą pasirinkimų iš kur importuoti elektrą. Tuomet ir kyla klausimas ar mes nesame saugūs ir be vidinio gamybos rezervo. Kadangi VIAP lėšos yra kiekvienais metais perskaičiuojamos ir perskirstomos ilginiui situacija nėra pastovi. Stebint VIAP lėšų paskirstymo istoriją galime pamatyti nuoseklų šios srities rėmimo mažinimą [11].

1.2.5 Energetikos ministerijos tikslai ir strategija

Lietuvos tikslas yra iki 2020 metų pasiekti 23% visos suvartojamos energijos pagaminti būtent atsinaujinančiais energijos ištekliais. Norima, kad AEI (pagrinde biomasės) gaminama elektros energija sudarytu 20% visos Lietuvoje gaminamos elektros, biomase būtų padengiama 70% centralizuoto šilumos tiekimo poreikių. Laikomasi energijos gaminimo, transportavimo efektyvumo kėlimo, AEI rėmimo ideologijos.

Šiuo metu Lietuvoje naudojamos pagrindinės kogeneracinių jėgainių deginančių biomasę rėmimo galimybės yra 12 metų garantuojamos kvotos. Parduodamos elektros tarifams nustatomos aukciono principu (įrenginiams nuo 10 kWe), išduodamos investicinės paramos iš Europos struktūrinių fondų. Paramos gali būti suteikiamos iki 2020 metų.[12]

Lentelė 3 Elektros kainos pardavimo tarifai biomasės jėgainėms Lietuvoje.

	Matavimo vnt.	2015 IV ketvirtis	2016 I ketvirtis	2016 II ketvirtis	2016 I pusmetis	2017 I pusmetis
Naujos biomasės kogeneracinės jėgainės						
IG < 10 kW	EUR ct/kWh	8,1	7,7	7,7	6,6	6,6
10 kW < IG ≤ 5000 kW		7,0	6,7	6,7	5,7	5,7
IG > 5000 kW		6,4	6,0	6,0	5,1	5,1

Aukšto naudingumo kogeneracinės jėgainės deginančios, biomasę, biodujas ar atliekas ir gaminančios elektrą yra efektyvios priemonės norint sumažinti Lietuvos energetinę priklausomybę, o tai yra vienas iš pagrindinių Lietuvos energetikos strategijos prioritetų atsižvelgiant į dabartinį didelį elektros ir gamtinių dujų importą. Beje jau yra numatyta ir antroji jungtis su Lenkija „LitPol link 2“, skirta užtikrinti elektros energijos tiekimo saugumui pirmosios gedimo atveju. Ateityje naudojantis Lenkijos ir Švedijos jungtimi „SwePol“ ir Lietuvos Lenkijos jungtimi „LitPol link“ tranzitu per Lenkiją esant palankioms sąlygoms bus galima papildomai prekiauti elektra su Švedija.

Povandeninis 700 MW kabelis per Baltijos jūrą į Švediją laikomas vienu iš didžiausių energetikos ministerijos darbų nuo Ignalinos AE uždarymo 2010 –aisiais. „NordBalt“ jungtis sukūrė regioninę Baltijos valstybių elektros rinką ir įgalino pirkti šiaurės šalyse pagamintą pigesnę elektros energiją, ko pasekoje tiesiogiai atpigo galutinę elektros kainą vartotojams.

Taip pat numatoma atlikti sąnaudų ir naudos studijas dėl antros papildomos elektros jungties su Švedija ir Kruonio HAE penktojo bloko projekto.

1.3 Šilumos transformavimas ir mokslinės literatūros apžvalga

Iš ankstesnio skyriaus apžvalgos galima suprasti, kad Lietuvos teisinė infrastruktūra ir jos ateitis yra palanki biokuro kogeneracijai. Tačiau esama tarpkontinentinė elektros rinka – stipriai konkurencinga. Pranašumą ir išskirtinumą įgyti galima, įsisavinus inovatyvias technologijas.

Šilumos transformavimo technologija – ekologiškas ir efektingas šiluminės energijos generavimo būdas. Sistemos „variklis“ yra kompresorius, kuriam sukurti reikalinga mechaninė arba dažniausiai naudojama – elektros energija. Priklausomai nuo transformacijos koeficiento, žinosime kiek šiluminės energijos kWh gausime sunaudoję 1 kWh elektros. Paprastai santykis svyruoja nuo 3:1 iki 10:1; jeigu koeficientas mažesnis nei 4, dažniausiai tokios šilumos siurblio sistemos nauda ir atsiperkamumas yra abejotini dėl didelės jos kainos ir pastoviųjų išlaidų.

Šilumos siurblys kogeneracinėje jėgainėje sukuria keletą pranašumų prieš analogišką jėgainę be jo. Vienas iš pranašumų yra didesnis pirminės šilumos energijos išnaudojimas. Tipiniame kogeneracijos cikle, garas kondensatoriuje gali būti išplečiamas daug mažiau nei su šilumos siurbliu, kuris puikiai tinkamas išnaudoti daug žemesnę temperatūrą gaunamą garui turbinoje išsiplėtus labiau. Toks ciklo pokytis lemtų didesnę pagamintos elektros energijos kiekį ir pirminės šiluminės energijos išnaudojimo santykį.

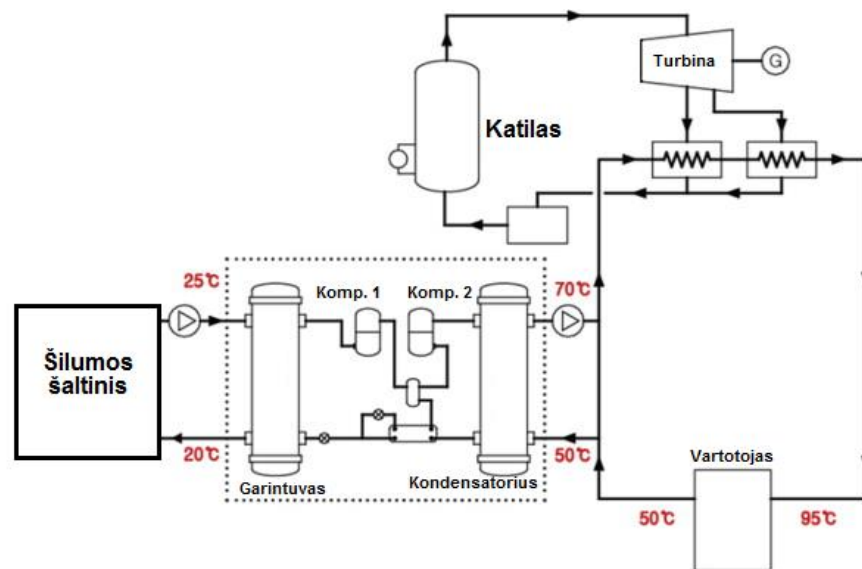
Kitas pranašumas pasireiškia žiemos sezono metu, užėjus šalčio bangoms. Kai reikalinga didesnė tiekiamo termofikacinio vandens temperatūra, paprastose kogeneracinėse jėgainėse ji pasiekama koreguojant garo kiekį per įrengtus tarpinius garo nuvedimus iš turbinos. Šie garo nuvedimai sumažina turbinos naudingumo koeficientą. Tuo tarpu šilumos siurblio kondensacijos temperatūra yra lengvai valdoma kompresoriaus suslėgimo laipsniu. Be abejo didesnis suslėgimo laipsnis pareikalaus daugiau elektros energijos, bet tokia situacija susidarys tik laikinai, - ypatingai šaltais periodais.

Šilumos siurblys pasižymi didele kaina eiliniam žmogui, tačiau energetinio objekto kapitaliniai kaštai yra nepalyginamai didesni, o kondensatorius ir garintuvas, reikalingi pramoniniam šilumos siurbliui, bus santykinai pigesni dėl jų mažėjančios kainos priklausomybės nuo sukuriamos galios.

Kogeneracinė jėgainė su šilumos siurbliu skirtu paimti žemo potencialo atliekinę šilumą pasaulinėje praktikoje nėra dar neišbandyta technologijų kombinacija. Tokia sistema nėra priklausoma nuo klimato zonos, tad jėgainės su šilumos siurbliais išsibarsčiusios daugelyje šalių. Įrenginių kombinacijų ir modifikacijų taip pat yra įvairiausių. Apžvelgsiu keletą teorinių studijų ir jau praktikoje išpildytų sprendinių.

Dviejų pakopų suspaudimo efektyvumo įvertinimas šilumos siurblio sistemoje naudojant atliekinę šilumą; [Ohkyung Kwon, Dongan Cha, Chasik Park. – Pietų Korėjos Respublika 2013m.]

Atliktuose tyrimuose, kurie įvairiais darbo režimais tikrino dviejų pakopų suspaudimo efektyvumą šilumos siurblio sistemoje naudojant atliekinę šilumą buvo surinkti tokie rezultatai. Kylant šilumos šaltinio temperatūrai šilumos siurblio centralizuotam šilumos teikimui išnaudojant atliekinę šilumą sistemos darbas taip pat pagerėjo. Kai šilumos šaltinio temperatūra buvo pakelta nuo 10 °C iki 30 °C, sistemos naudingumas pakilo net 22,6 %. Kai pirmosios pakopos kompresoriaus įėjimo agentas buvo perkaitinamas nuo 2 °C iki 11 °C, agento masinis debitas ir šiluminė talpa nukrito atitinkamai 7,6 % ir 2,2 %, tačiau nepasireiškė joks aiškus pokytis tiekiamo karštame vandens temperatūroje ar sistemos efektyvume. Varyjuojant antrosios pakopos kompresoriaus dažniu taip keičiant tarp kompresorių esantį slėgį pasireiškė efektyvumo padidėjimu iki 5,2 % esant toms pačioms šilumos šaltinio sąlygoms.[13]



8 pav. Kogeneracinės jėgainės schema su dviejų pakopų suspaudimo šilumos siurbliu

Kogeneracinė jėgainė su absorbciniu šilumos siurbliu centralizuotam šilumos tiekimui; [*Agnese Lickrastina, Normunds Talcis ir Egils Dzelzitis – Latvija 2014m.*]

Kylančios kuro kainos, gamtosauginės iniciatyva buvo pagrindinės priežastys Latvijos inžinieriams ieškoti kaip sumažinti šilumos nuostolius technologiniuose procesuose. Tokioms idėjoms išpildyti jie pasirinko Imanta centralizuoto šildymo jėgainę, kurioje buvo įrengtas absorbcinis šilumos siurblys surenkantis atliekinę šilumą iš kogeneracijos ciklo aušinimo dalies ir paruošiantis ją centralizuotam šilumos tiekimui. Absorbcinio šilumos siurblio generatoriui šiluminė energija tiekama iš jėgainėje jau įrengto garinio katilo.

Kadangi aušinimo bokštas tapo nebenaudojamas, šilumos siurbliui buvo įrengta atskiro kontūro aušinimo sistema, kuri užtikrina mažesnę chemiškai apdoroto papildymo vandens kiekį ir padėjo išvengti korozijos bei mikrobu. Tačiau aušinimo bokštas vis dar naudojamas kai aušinimo apkrova viršija šilumos siurblio aušintuvo galią.

Tokio absorbcinio šilumos siurblio panaudojančio atliekinę šilumą iš kogeneracijos ciklo ir paruošančio vandenį centralizuotam šilumos tiekimui naudingumo koeficientas labai priklauso nuo jėgainės veikimo režimų, darbinių šilumnešio temperatūrų ir lauko temperatūros.

Šilumos siurblio įrengimas šioje kogeneracinėje jėgainėje leidžia pakeisti aušinimo bokštą ir tuo pačiu metu konvertuoti žemo potencialo šilumą į tinkamą centralizuotam šilumos tiekimui. Kadangi abejoms sistemoms neįmanoma dirbti maksimaliu naudingumu vienu metu, reikia pasirinkti prioritetus.

Absorbcinis šilumos siurblys pilnai gali būti naudojamas norint padidinti kogeneracinės jėgainės bendrą naudingumo koeficientą, tačiau norint įvertinti jo tinkamumą konkrečiai sistemai, reikia būtinai atlikti išsamius skaičiavimus ir tyrimus.[14]

Apkrovos prognozavimas ir valdymo optimizavimas kogeneracinei jėgainei su elektros ir šilumos energijos talpinimu; [*Michael Short, Tracey Crosbie, Muneeb Dawood, Nashwan Dawood – Didžioji Britanija 2016m.*]

Energijos rinkos liberalizavimas, didmeninė prekyba elektros energija „parai į priekį“, valandiniai kainų pokyčiai atidarė naujas nišas technologijoms prisiderinančioms būtent prie šių aspektų.

Studijoje įrodyta jog naudojant tam tikrą programinę įrangą, galima ne tik automatizuoti daugelį valdymo įrenginių, bet ir greičiau reaguoti į kogeneracinės jėgainės apkrovos pokyčius. Senesnių jėgainių atnaujinimas tokia įranga yra palyginus nebrangus. Veikimo principas remiamas šilumos ir elektros energijos kainų svyravimo išnaudojimu. Esant pigiam energijos supirkimui ji yra kaupiama talpose. Kadangi neįmanoma sukaupti didelių elektros energijos kiekių, jį yra kaupiama netiesiogiai, t.y., konvertuojama į kitos rūšies energiją šilumos siurbliu, suspausto oro energija ar mechanine potencine energija smagračiuose.

Ištyrus metus registruotus duomenis buvo prieita prie išvados jog toks kogeneracinės jėgainės patobulinimo išpildymas gali sumažinti vidutinę energijos pagaminimo kainą. Taip pat pastebėta, kad yra gana didelė perspektyva toliau tirti jėgainių apkrovos pokyčių prognozavimo galimybes, nes būtent tai leidžia sutaupyti daugiau pinigų lyginant su energijos kaupimo technologijų išpildymu.[15]

Mažų vandeniui aušinamų reaktorių ir termocheminės energijos talpinimo kombinacija kogeneracijos sistemoms; [*Hirokazu Ishitobi, Junichi Ryu, Yukitaka Kato – Japonija 2015m.*]

Jau ne pirmas dešimtmetis kai studijuojamos mažų atominių reaktorių (nuo 5 iki 300 MWt) galimybės panaudoti jų aušinimo šilumą kogeneracijai. Paprastai atominės elektrinės yra eksploatuojamos stabiliais, nekintančiais darbiniais parametrais, bet šilumos poreikis pavyzdžiui centralizuotai šilumos sistemai būna kintantis. Aušinimo šilumos kiekis yra pastovus, tad šilumos nuėmimo poreikių išlyginimui siūloma termocheminės energijos talpykla yra potencialus problemos sprendimas. Geriausia medžiaga atitinkanti reaktoriaus aušinimo parametrus buvo pasirinkta LiCl/Mg(OH)_2 , jos terminė inercija taip pat yra tinkamesnė lyginant su vandeniu. Termocheminė talpa būtų naudojama kaip miesto ar kitų vartotojų šilumos poreikių išlyginimo įrenginys. Esant minimaliam poreikiui dalis atliekinės aušinimo šilumos būtų kaupiama termocheminėje talpoje, o kita dalis tiekama centralizuotai šilumos sistemai. Miesto šilumos poreikiams esant maksimaliems dalis reikalaujamos energijos parūpinama iš reaktoriaus atliekinės šilumos, kita dalis jau iš termocheminėje talpoje sukauptos šilumos. Tyrime atlikti teoriniai skaičiavimai rodo, kad LiCl/Mg(OH)_2 termocheminė talpa naudojama šilumos poreikių svyravimui išlyginti yra daug žadanti technologija.[16]

Optimalaus šilumos kaupimo talpos dydžio nustatymas kogeneracinei jėgainei; [*Stjepko Katulic, Mislav Čehil, Željko Bogdan – Kroatija 2014m.*]

Esant pastoviai apkrovai šiluminės energijos padidėjusio poreikio kompensavimas atsiliepiama sumažėjusiai elektros energijos gamybai. Pagrindinis šilumos kaupimo talpos tikslas yra padaryti šilumos ir elektros energijos gamybą kuo mažiau priklausomą viena nuo kitos. Šilumos kaupimo talpa gali sukaupti tam tikrą kiekį šiluminės energijos būtent tuomet, kai jos gaminama šiek tiek per daug ir tokia šiluma tampa atliekiniu produktu, o panaudoti esant didesniam poreikiui arba kai šilumos gamyba nėra prioritetas.

Norint surasti optimalų šilumos kaupimo talpos dydį matematinis modelis turi įvertinti daugiau nei 1300 kintamųjų. Talpos dydis kinta priklausomai nuo jėgainės galios, elektros energijos kainų, jėgainės investicinių kaštų. Akumuliacinė talpoje šiluma taip pat gali būti sukaupiama, kai elektros energijos kainos yra mažos, o vėliau parduodama, kai kainos vėl pakyla. Tokios talpos išlygina ir stabilizuoja pastovų šiluminės energijos tiekimą, padidina jėgainės patikimumą ir lankstumą. Kadangi energija gaminama efektyviau, sumažėja šiltnamio efektą skatinančių medžiagų išmetimai. Tokia sistema yra pelningesnė palyginus ją su sistema be akumuliacinės talpos. Šiluma atsiradus poreikiui sumažina pikinių apkrovų katilų reikiamumą.[17]

1.4 Efektyvumo didinimo analizė ir galimybės

Visi mokslinės literatūros apžvalgoje aptarti straipsniai ir juose aprašyti metodai atliekinės šilumos panaudojimui ar tiesiog šilumai akumuliuoti turi daug pranašumų, bet kartu išsiskiria kažkokių bruožu, kurių kiekvienas yra vertas atskiro išsamaus tyrimo ir dėmesio. Mokslas žengia į priekį, atsiranda naujos technologijos, kuriamos naujos medžiagos, tobulėja informacinės technologijos, be kurių šiuolaikinės jėgainės neįsivaizduojamos, padidėję įvairių įrenginių naudingumo koeficientai tampa konkurencingi, keičiasi įstatymai ir ekonominė padėtis, - visi šie ir dar daugiau faktorių atveria galimybes naujiems inžineriniams sprendimams. Viską įvertinus standartinė kogeneracinė jėgainė lieka tarsi išstumta iš šiuolaikinių technologijų olimpo. Tačiau jokių būdu negalima atsisakyti kogeneracijos, visgi būtent tokia jėgainė yra darbe aptariamų idėjų pamatas.

Rinka veikia paprastai – joje vienu metu gali būti tik tam tikras kiekis dalyvių, todėl yra privalu veikti pagal esamą situaciją ir nuolat tobulėti. Griežtėja aplinkosauginiai reikalavimai, kurie stipriai riboja mazuto ir anglies naudojimą, tuo pačiu metu Europos energetikos politika labai stipriai remia atsinaujinančius energijos šaltinius, o visa tai be abejonės veda vienintele kryptimi – iškastinį kurą keisti į biokuro deginimą. Ištobulėjus biokuro deginimo technologijoms, sudėtingi procesai šio kuro panaudojime vis patikimesni. Biokuro išskirtiniai įrenginiai tampa universalūs, standartizuojami ir netgi serijiniai.

Elektros energija, kaip aukščiausios rūšies energija yra labiausiai vertinamas gamybos produktas energetikoje. Ją galima naudoti tiesiogiai arba versti į žemesnės rūšies mechaninę, cheminę ar kinetinę energiją. Nepriklausomumas nuo užsienio šalių, ar net elektros energijos eksportavimas yra vienu šalių geros ekonomikos pagrindinis veiksnys, o kitų – siekiamybė. Tuo tikslu, tiek Europos struktūriniai fondai tiek kai kurių šalių vidaus įstatymų politika pasiryžusi investuoti į taip stipriai simpatizuojančius anksčiau minėtus elektros energijos suteikiamus privalumus. Dėl Lietuvoje įsišaknijusios ir puikiai išpuoselėtos CŠT sistemos kogeneracija šiuo metu yra intuityvi išėitis. Didžiausias jos privalumas, turint omenyje, kad ieškoma optimaliausio būdo gaminti elektrai yra tai, jog pagamintos kilovatvalandės kaina tokioje jėgainėje yra daug mažesnė nei paprastoje kondensacinėje elektrinėje. Kogeneracinės jėgainės saugumu nukonkuruoja atomines elektrines, o atsinaujinantys energijos šaltiniai kaip vėjas, vanduo, saulė ar geoterminė energija (neskaitant hidroelektrinių ir geoterminių jėgainių, kurių potencialas jau išnaudotas) suteikia per mažai galios, be to jų tiekiamą energiją nėra pastovi.

Šiluminės katilinės šioje diskusijoje nedalyvauja, nes jos negamina elektros. Lyginant kondensacinę ir kogeneracinę jėgaines pasirenkame pastarąją, kadangi ji efektyviau išnaudoja kurą. Tačiau kogeneracinė jėgainė vis tiek neprilygsta žemutinės šiluminės vertės išnaudojimo koeficientu (~80 %) šiluminei katilinei (~100 %). Vienas iš būdų pakelti bendrą jėgainės naudingumo koeficientą yra šilumos siurbliu panaudoti kogeneracijos cikle esančią atliekinę žemo potencialo šilumą. Paprastai aušinimo bokšte vėsinamas kondensatoriaus aušinimo vanduo savyje neša nemažai šilumos. Šilumos siurblio technologija gali ją konvertuoti į pardavimui tinkamą energiją. Vyrauja stereotipas jog, šios technologijos atsipirkimo laikas yra labai ilgas ir dažnai atsveriamas tik eksploatavimo paprastumo privalumu, deja, pramoninėje jėgainėje šis aspektas negalioja. Nepaisant to, kogeneracinė jėgainė yra produkto gamintojas, o tai reiškia, kad čia gaminama elektros energija yra kelis kartus pigesnė už rinkos siūlomą kainą. Sava elektros energija yra pagrindinis faktorius įgalinantis šilumos siurblio technologijos panaudojimą žemo potencialo atliekinei šilumai konvertuoti. Taip gauname daugiau energijos iš to pačio kiekio kuro.

Visas biokuro ruošimo, transportavimo, deginimo ciklas reikalauja daug daugiau finansinių ir žmogiškųjų išteklių lyginant su paprastomis dujinėmis jėgainėmis. Biokuro įranga nėra tokia ilgaamžiška, ji reikalauja didesnių eksploatacinių kaštų. Kogeneracinių jėgainių investiciniai kaštai sunkiai pritraukia investuotojus, o biokuro įrangos kaina dar labiau juos išpučia. Šilumos siurblys net buitiniame lygmenyje yra labai brangus pasirinkimas, tad pramoninis variantas turi būti labai gerai pasvertas prieš pasiryžtant jį įgyvendinti. Didelė šilumos siurblio kainos dalis priklauso nuo jo įrangos galios (kompresoriaus galia, kondensatoriaus ir garintuvo naudingas plotas), o jie tiesiogiai priklauso nuo ciklo COP.

Pirmasis nagrinėjamas variantas naudoja kondensacinės elektrinės vandens garo ciklą. Jis nuo kogeneracinio skiriasi išaugusiu naudingo veiksmo koeficientu, kurį lemia didesnis į turbiną įeinančio ir jau atidirbusio garo entalpijų skirtumas. Kadangi darbe prisirišame prie vienodos nominalios elektrinės galios visuose variantuose, didesnis η_T šiuo atveju leidžia sutaupyti sudeginamo biokuro. Tam pačiam elektros kiekiui pagaminti šiuo atveju reikia mažiau šiluminės energijos. Šilumos siurblys čia išnaudoja ciklo atliekinę šilumą kondensatoriuje. Sotus garas jame atitinka maždaug 33 °C temperatūrą, - tai žemo potencialo šilumos šaltinis. Palaikyti pilną garo ciklą padės po išsiplėtimo vožtuvo atėjęs šaltinis šilumos siurblio agentas. Į miestą tiekiamo vandens temperatūra svyruoja nuo 75 °C iki 100 °C, atitinkama temperatūra bus reguliuojama automatizuotai keičiant kompresoriaus suspaudimo laipsnį ir tiekiamo termofikacinio vandens srautą, tačiau toks temperatūros skirtumas gali lemti mažesnę COP.

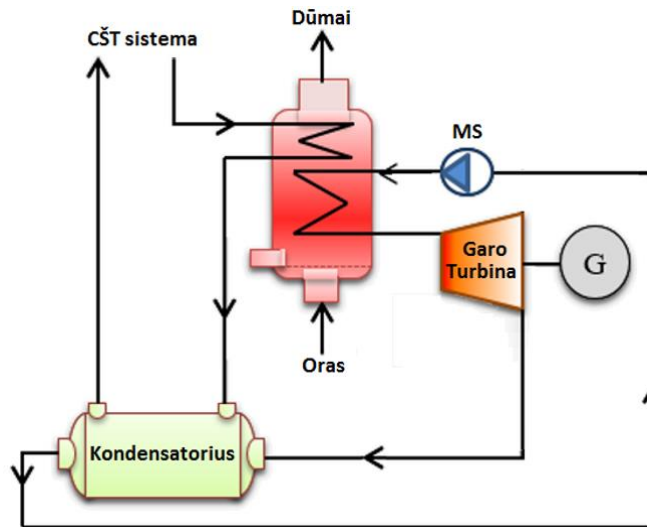
Priklausomai nuo jėgainės energijos pardavimo sąlygų ar termodinaminio ciklo ypatumų, šilumos siurblių galima pritaikyti skirtingai, - su šilumos akumuliacija, periodinio veikimo, įjungti jį į įvairias kogeneracijos ciklo dalis, transformuoti visą ar tik dalį ciklo šilumos. Bendru atveju transformavimo koeficientas yra pakankamai geras dėl aukštos atliekinės šilumos temperatūros. Norint gauti kuo didesnę COP reikia sumažinti didelį temperatūros skirtumą tarp šilumos siurblio kondensatoriaus ir garintuvo. Tai galima padaryti šilumos siurbliu nesikišant į vandens garo ciklą, o pasisavinti tik šilumą atgautą iš gilesnio dūmų (jau po ekonomizerio) atvėsinimo. Šilumos šaltinis tuomet tampa nebe iš turbinos išėjusio atidirbusio garo šilumos likutis, o šlapi dūmai, kurie savyje turi dar nemažai šilumos. Ji susideda iš dviejų dalių: slaptoji garavimo šiluma atgaunama kondensuojantis dūmuose esančiam vandeniui ir karštos dujos atiduodančios šilumą konvekciniu būdu. Kompresorinio šilumos siurblio garintuvas savo agentą išgarina apie 50 - 30 °C temperatūros terpėje, o kitame jo gale, - kondensatoriuje vandenį pašildyti tereikia iki vos aukštesnės už grįžtamo iš tinklų termofikacinio vandens temperatūros.

Biokuras, atsinaujinantys energijos šaltiniai, kogeneracija, šilumos siurblys naudojantis jėgainės pagamintą elektrą, draugiška aplinkai jėgainė – tai šio tyrimo raktiniai žodžiai, kurių kombinacija atrodo labai patraukliai, tačiau idėjai įgyvendinti reikia nuodugniai įvertinti sistemos sudėtingumą, papildomų ir bazinių įrenginių investicinius kaštus bei rinkos ekonominę situaciją.

2. KOGENERACINĖS JĖGAINĖS GALIMŲ VARIANTŲ TERMODINAMINĖ ANALIZĖ

2.1 Įprastinė biokuro kogeneracinė jėgainė

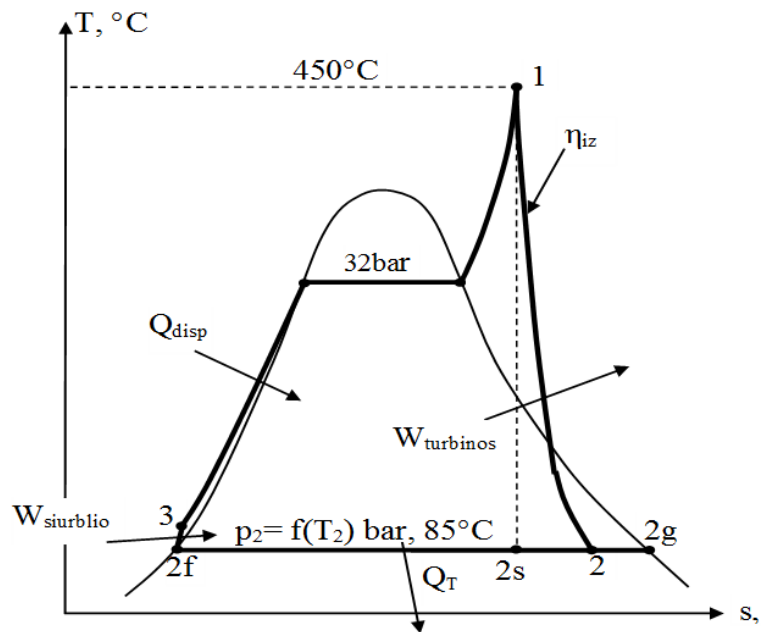
Lyginant tipinę gamtinėmis dujomis kūrenamą kogeneracinę jėgainę su biokuro, pagrindinis skirtumas, darantis įtaką garo ciklui, yra žemesni perkaitinto garo parametrai. Deginant chemiškai nepaveiktą biokurą šių dienų technologijomis galime pasiekti apie 550 °C garo temperatūrą, jei biokuro kokybė prasta ar jis maišytas su atliekomis temperatūra turi būti numažinta iki 440 °C, taip bus išvengiama per didelio šlakavimosi ir paviršių erozijos.[18]



9 pav. Kogeneracinės jėgainės principinė schema

Ciklo naudingumo koeficiento skaičiavimas prasideda nuo užsiduodamų parametrų: į turbiną įeinančio perkaitinto garo temperatūra ir slėgis, iš turbinos išėjusio atidirbusio garo temperatūra, maitinimo siurblio ir turbinos izoentropiniai koeficientai:

- $T_1 = 450\text{ °C}$;
- $p_1 = 32\text{ bar}$;
- $T_2 = 85\text{ °C}$;
- $\eta_s = 0.8$;
- $\eta_{iz} = 0.8$.



10 pav. Kogeneracinės jėgainės Renkino ciklas

Naudojantis „CoolPack“ programa randame būdingų ciklo taškų parametrus, reikalingus ciklo naudingumo koeficientui rasti:

Turint T_1 ir p_1 galime rasti perkaitinto garo entalpiją $h_1 = 3340.94$ kJ/kg ir entropiją $s_1 = 7050.48$ J/kg K;

Entropija s_1 yra lygi išsiplėtusio garo entropijai neįvertinus turbinos izoentropinio koeficiento – $s_1 = s_2 = 7050,48$ J/kg K;

Iš turbinos išėjusio atidirbusio garo kondensacijos slėgis yra tiesiogiai proporcingas dydis to taško temperatūrai, kuri nustatoma pagal tiekiamo termofikacinio vandens temperatūrą. Jei į tinklus tiekiamas termofikacinis vanduo pašildomas iki 80 °C tai garo temperatūra turėtų būti apie 5 °C didesnė. Taigi prie 85 °C garo kondensacijos slėgis bus $p_2 = 0,578$ bar;

Toliau randame entalpijas ir entropijas sotoaus garo bei sauso garo ribiniuose taškuose: $h_{2f} = 356,82$ kJ/kg, $h_{2g} = 2651,61$ kJ/kg, $s_{2f} = 1136,79$ J/kg K, $s_{2g} = 7544,13$ J/kg K;

Teorinio idealaus garo išsiplėtimo entalpiją h_{2s} apskaičiuojame taip:

$$\begin{aligned} h_{2s} &= h_{2f} + (h_{2g} - h_{2f}) \frac{s_2 - s_{2f}}{s_{2g} - s_{2f}} = \\ &= 356,82 + (2651,61 - 356,82) \frac{7050,48 - 1136,79}{7544,13 - 1136,79} = 2391,743 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned} \quad (1)$$

Maitinimo vandens siurblio suspaudimo entalpijos prieaugis:

$$h_3 = h_{2f} + \frac{v_{2f} \cdot \Delta p_k}{\eta_s} = (356,82) \cdot 10^3 + \left(\frac{0,001 \cdot (32 - 0,578)}{0,8} \right) \cdot 10^5 = 360,748 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (2)$$

Atidirbusio garo entalpija h_2 randama iš šios balanso lygties:

$$\begin{aligned} (h_1 - h_2)\eta_{iz} &= h_1 - h_{2s} \\ h_2 &= h_1 - (h_1 - h_{2s})\eta_{iz} = 3340,94 - (3340,94 - 2391,743) \cdot 0,8 = 2581,583 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned} \quad (3)$$

Turime visus reikalingus duomenis ir galime skaičiuoti termodinaminį ciklo naudingumo koeficientą:

$$\eta_k = \frac{(h_1 - h_2) - (h_3 - h_{2f})}{h_1 - h_3} = \frac{(3340,94 - 2581,583) - (360,748 - 356,82)}{3340,94 - 360,748} = 0,253 \quad (4)$$

Šilumos ir elektros energijos srautų analizė

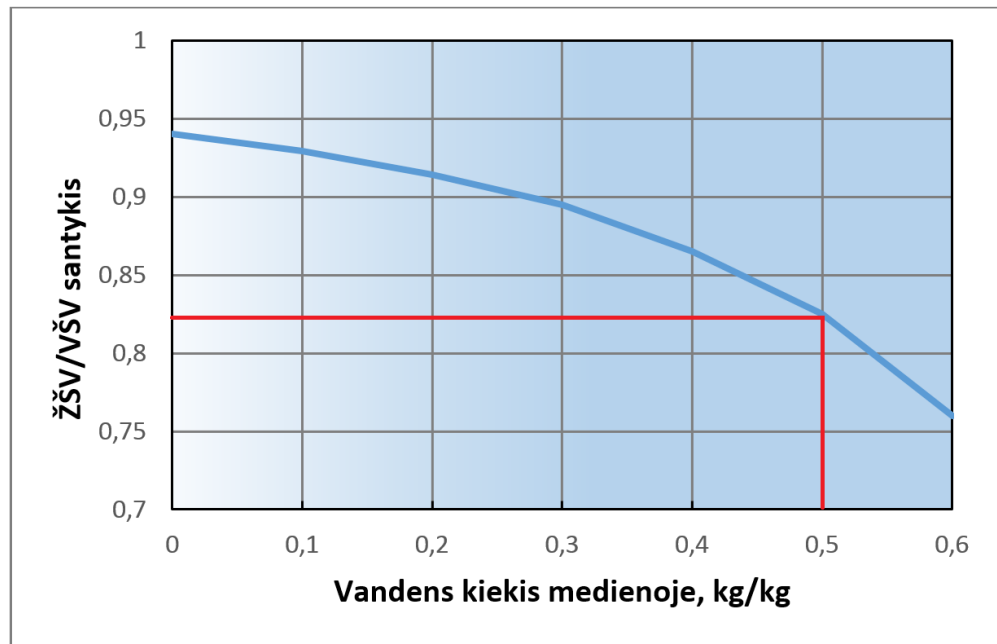
Kadangi žaliosios elektros energijos pardavimo kvotos yra skirstomos pagal įrengtąją galią, o biokuro jėginių šilumos generavimo pajėgumai yra riboti, optimaliausias variantas yra pasirinkti 5 MW elektrinės galios turbiną. Todėl 5 MW elektros energijos pagaminti su 0,253 ciklo naudingumo koeficientu reikės gauti tiek šiluminės energijos:

$$Q_1 = \frac{Q_{el}}{\eta_k} = \frac{5}{0,253} = 19,763 \text{ MW}_t \quad (5)$$

Iš esmės ši šiluma bus sunaudota kondensatoriuje kaitinant termofikacinį vandenį. Visas šilumos kiekis skaičiuojamas įvertinant šilumos nuostolius, kurie biokurą deginančioje jėgainėje yra apie 15 % - 20 %.[19][20]

$$Q_{disp} = Q_1 \cdot (1 + \Sigma Q_{nuost}) = 19,763 \cdot (1 + 0.2) = 23,715 \text{ MW}_t \quad (6)$$

Šiuolaikinės biokurą deginančios katilinės ir kogeneracinės jėgainės dėl ypatingai didelės kuro drėgmės labai retai sutinkamos be kondensacinių ekonomaizerių, kurie atgauna slaptąją šilumą iš dūmų.

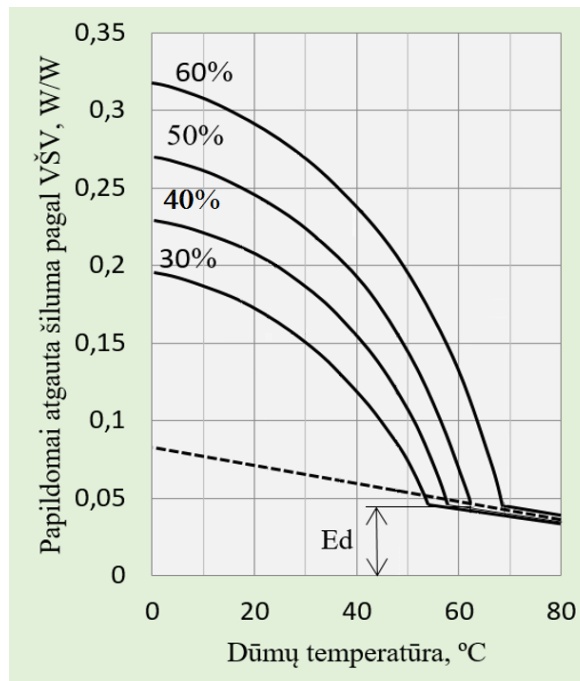


11 pav. Šilumingumo santykis tarp sausos ir šlapios medienos

Iš aukščiau pateikto grafiko matome, kad žemutinės šiluminės vertės (ŽŠV) santykis su viršutine šilumine verte (VŠV) ties 50 % drėgnumo riba yra ~0,82. Įvertiname sudeginto kuro gaunamą šilumą pagal VŠV:

$$Q_{disp}^{VŠV} = Q_{disp} \cdot (1 + (1 - 0,82)) = 23,715 \cdot 1,18 = 27,984 \text{ MW}_t \quad (7)$$

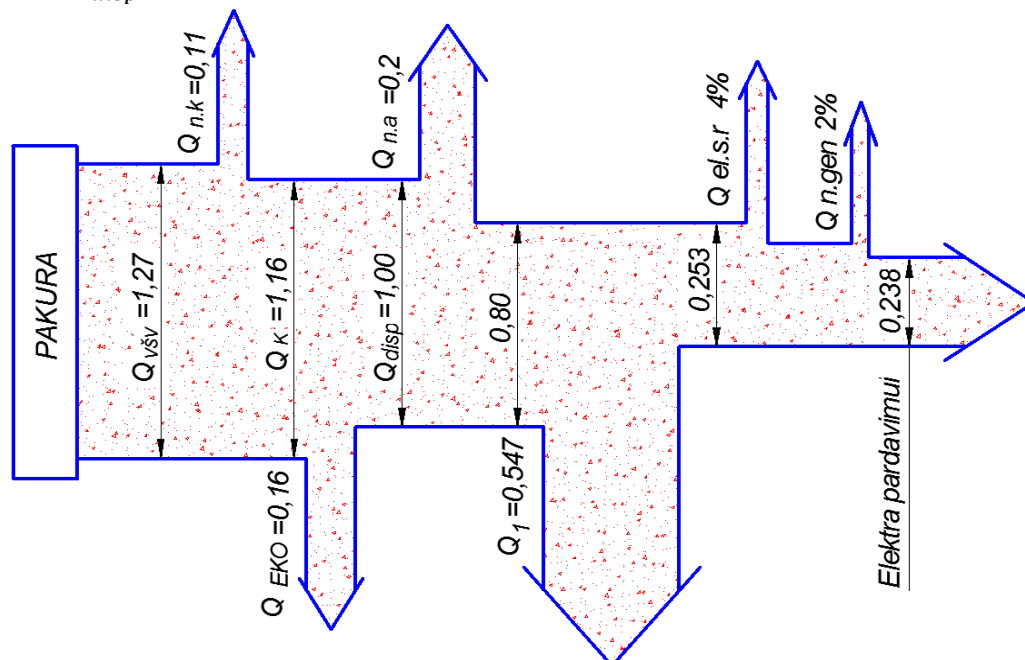
Kondensacinis ekonomizeris vidutiniškai jėgainės naudingumo koeficientą padidina 15 % - 20 % procentų. Skaičiavimuose priimame 50 % kuro drėgnumą, tad iš 12 pav., nustatome pagal VŠV atgautos šilumos dalies koeficientą, kuris šiuo atveju yra 0,16.



12 pav. Atgautos šilumos priklausomybė nuo dūmų atvėsavimo laipsnio

Įvertinę šiuos pagrindinius visos jėgainės šilumos srautus gauname galutinę nominalią galią. Ją vėliau naudosime termodinaminių parametrų lyginime su kitais jėgainių tipais, bei ekonominiuose skaičiavimuose.

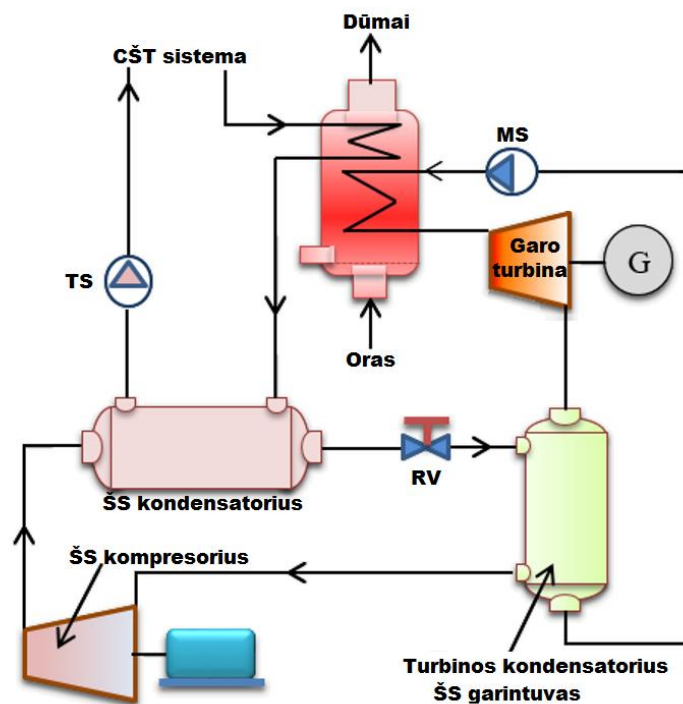
$$Q_k = Q_{disp}^{VŠV} \cdot 0,16 + Q_1 = 27,984 \cdot 0,16 + 19,763 = 24,241 \text{ MW}_t \quad (8)$$



13 pav. Įprastinės biokuro kogeneracinės jėgainės termodinaminės analizės schema

2.2 Biokuro kogeneracinė jėgainė su šilumos siurbliu

Elektros energiją gaminančių jėgainių atliekinė šiluma, išeinanti pro aušinimo bokštus, visuomet atrodė neracionalus energijos švaistymas. Šilumos siurblio technologija puikiai tinka šioje nišoje norint panaudoti didelius, bet žemo potencialo šilumos kiekius. Biokuro kogeneracinės jėgainės garo ciklas orientuojamas į didesnio efektyvumo elektros gamybą, o šilumos siurblys transformuos visą ciklo atliekinę šilumą. Tai yra jo garantuvas atstos turbinos kondensatorių. Garas išplečiamas iki aplinkos temperatūrą atitinkančio slėgio.

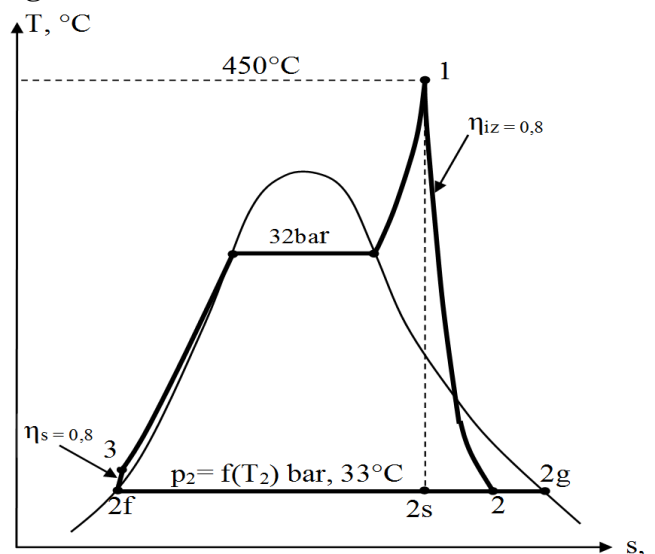


14 pav. Biokuro kogeneracinė jėgainė su šilumos siurbliu

Šilumos siurblio panaudojimo įtaka garo ciklo naudingumo koeficientui

Norint sulygtinti naudojamos technologijos variantus tarpusavyje, pradinius į turbiną įeinančio garo parametrus užsiduodame tokius pat kaip ir anksčiau. Šiame cikle kinta tik iš turbinos išėjusio atidirbusio garo slėgis ir temperatūra.

- $T_1 = 450\text{ °C}$;
- $p_1 = 32\text{ bar}$;
- $T_2 = 33\text{ °C}$;
- $\eta_s = 0.8$;
- $\eta_{iz} = 0.8$.



15 pav. Šilumos siurblio įtaka garo ciklui

Naudojantis CoolPack programa randame būdingų ciklo taškų parametrus, reikalingus ciklo naudingumo koeficientui rasti:

Perkaitinto garo entalpija $h_1 = 3340.94$ kJ/kg;

Perkaitinto garo entropija $s_1 = 7050.48$ J/kg K;

Entropija $s_{2s} = 7050,48$ J/kg K;

Iš turbinos išėjusio atidirbusio garo kondensacijos slėgis šiuo atveju yra tiesiogiai proporcingas dydis, to taško temperatūrai, kuri atitinka aplinkos temperatūrą. Taigi prie 33 °C garo kondensacijos slėgis bus $p_2 = 0,05$ bar;

Toliau randame entalpijas ir entropijas, sotaus garo bei sauso garo ribiniuose taškuose: $h_{2f} = 137,37$ kJ/kg, $h_{2g} = 2561,13$ kJ/kg, $s_{2f} = 476,37$ J/kg K, $s_{2g} = 8394,77$ J/kg K;

Teorinio idealaus garo išsiplėtimo entalpiją h_{2s} apskaičiuojame taip:

$$\begin{aligned} h_{2s} &= h_{2f} + (h_{2g} - h_{2f}) \frac{s_{2s} - s_{2f}}{s_{2g} - s_{2f}} = \\ &= 137,37 + (2561,13 - 137,37) \frac{7050,48 - 476,37}{8394,77 - 476,37} = 2149,658 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned} \quad (9)$$

Maitinimo vandens siurblio suspaudimo entalpijos prieaugis:

$$h_3 = h_{2f} + \frac{v_{2f} \cdot \Delta p_k}{\eta_s} = (137,37) \cdot 10^3 + \left(\frac{0,001 \cdot (32 - 0,05)}{0,8} \right) \cdot 10^5 = 141,364 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (10)$$

Atidirbusio garo entalpija h_2 randama iš šios balanso lygties:

$$\begin{aligned} (h_1 - h_2)\eta_{iz} &= h_1 - h_{2s} \\ h_2 &= h_1 - (h_1 - h_{2s})\eta_{iz} = 3340,94 - (3340,94 - 2149,658) \cdot 0,8 = 2387,915 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned} \quad (11)$$

Turime visus reikalingus duomenis ir galime skaičiuoti termodinaminį ciklo naudingumo koeficientą:

$$\eta_k = \frac{(h_1 - h_2) - (h_3 - h_{2f})}{h_1 - h_3} = \frac{(3340,94 - 2387,915) - (141,364 - 137,37)}{3340,94 - 141,364} = 0,297 \quad (12)$$

Lyginant su įprastos biokuro kogeneracinės jėgainės ciklu, - šis ciklo η_k didesnis net 0,044 arba 15 %. Tai yra ypatingai svarbu, nes šilumos siurblio kompresorių suka elektros variklis, naudojantis jėgainės gaminamą elektros energiją.

Šilumos ir elektros energijos kiekių skaičiavimas

Kaip ir praėjusiame skyriuje, dėl ekonominių priežasčių renkamės 5 MW elektros instaliuotąją galią. Didesnis termodinaminis ciklo naudingumo koeficientas, tam pačiam elektros energijos kiekius pagaminti, leis sudeginti mažiau biokuro.

$$Q_1 = \frac{Q_{el}}{\eta_k} = \frac{5}{0,297} = 16,835 \text{ MW}_t \quad (13)$$

Gautas šilumos kiekis, kurį tokioje jėgainėje būtų sunku pavadinti atliekine ciklo šiluma, tiekiamas į turbinos kondensatorių – šilumos siurblio garintuvą. Paprastoje elektrinėje tai būtų nepanaudojami ciklo nuostoliai, tačiau šilumos siurblys įgalina tokios šilumos panaudojimą, - transformavimą iki CŠT reikalaujamos temperatūros.

Šilumos nuostoliai į aplinką sudaro tokią pat procentinę dalį. Įvertinę šiuos nuostolius žinosime, kiek biokuro reikia sudeginti norint gauti šilumos kiekį, reikalingą sukurti pradiniam perkaitinto garo parametrui.

$$Q_{disp} = Q_1 \cdot (1 + \Sigma Q_{nuost}) = 16,835 \cdot (1 + 0,2) = 20,202 \text{ MW}_t \quad (14)$$

Akivaizdu, kad šilumos siurblio dėka ta pati elektrinė galia gaunama sunaudojant mažiau biokuro.

Biokuro pakuroje išskiriama šiluma pagal viršutinę šiluminę vertę (biokuro drėgnumas 50 %):

$$Q_{disp}^{VŠV} = Q_{disp} \cdot (1 + (1 - 0,82)) = 20,202 \cdot 1,18 = 23,838 \text{ MW}_t \quad (15)$$

Ekonomaizeryje susigražinama slaptoji garų kondensacijos šiluma:

$$Q_{EKO} = Q_{disp}^{VŠV} \cdot 0,16 = 23,838 \cdot 0,16 = 3,814 \text{ MW}_t \quad (16)$$

Pagrindiniai šilumos siurblio techniniai parametrai

Didžiausias tokios sistemos trūkumas yra šilumos siurblio kompresoriaus suvartojama elektros energija. Jos kiekis priklauso nuo pagrindinio siurblio termodinaminio parametro - transformacijos koeficiento (COP). Kuo didesnis temperatūrų skirtumas tarp žemo potencialo šilumos šaltinio ir vartotojo reikalaujamos vandens temperatūros, tuo COP yra mažesnis. Tokios jėgainės atveju šilumą gauname kondensuojant iš turbinos išėjusį atidirbusį garą, kurio temperatūra yra 33 °C. Šilumos siurblio ciklas ją transformuoja iki vartotojo, t.y., šilumos tinklų užduodamos 80 °C temperatūros.

Agento virimo garintuve temperatūrą nustatome su sąlyga, jog norint kondensuoti iš turbinos išėjusį atidirbusį garą turėsime tiekti bent 3 – 5 °C žemesnės temperatūros nei garo kondensacijos temperatūra, taigi $t_0 = 28$ °C. Kadangi šilumos siurblys bus sumontuotas šildomoje patalpoje – katilinėje, siurbiamų į kompresorių garų temperatūra kiek aukštesnė už t_0 (virimo). Priimame, kad įsiurbimo temperatūra yra 3 °C aukštesnė, $t_0' = 31$ °C. Apskaičiuojame transformacijos koeficientą tokiomis sąlygomis, skaičiavimams atlikti į pagalbą vėl pasitelkiame programą „COOLPACK“.

Slėgis garintuve yra funkcija $p(t_0)$, todėl $p_0 = 7,267$ bar;

Turint agento virimo temperatūrą ir jo slėgį garintuve randame pirmojo ciklo taško (būsena prieš kompresorių) entalpiją ir entropiją: $h_1 = 415,71$ kJ/kg, $s_1 = 1721,29$ J/kg K;

Suspausto garo entropija s_{2s} yra lygi garų entropijai prieš kompresorių, neįvertinus kompresoriaus izoentropinio koeficiento: $s_{2s} = s_1 = 1721,29$ J/kg K;

Agento kondensacijos temperatūra nustatoma pagal į tinklus tiekiamo termofikacinio vandens temperatūrą, tad $t_k = 80$ °C. Slėgis siurblio kondensatoriuje yra funkcija $p(t_k)$, todėl $p_k = 26,324$ bar;

Taško 2s temperatūra randama pagal kondensacijos slėgį ir entropiją s_{2s} , $t_{2s} = 86,98$ °C, o turint šią temperatūrą randame ir šio taško entalpiją $h_{2s} = 441,79$ kJ/kg;

Taške 3 agentas yra sotaus skysčio būsenoje. Jo entalpija šiuo atveju priklauso nuo iš tinklų grįžtamos temperatūros, kurią priimame 45 °C; $h_3 = 263,71$ kJ/kg;

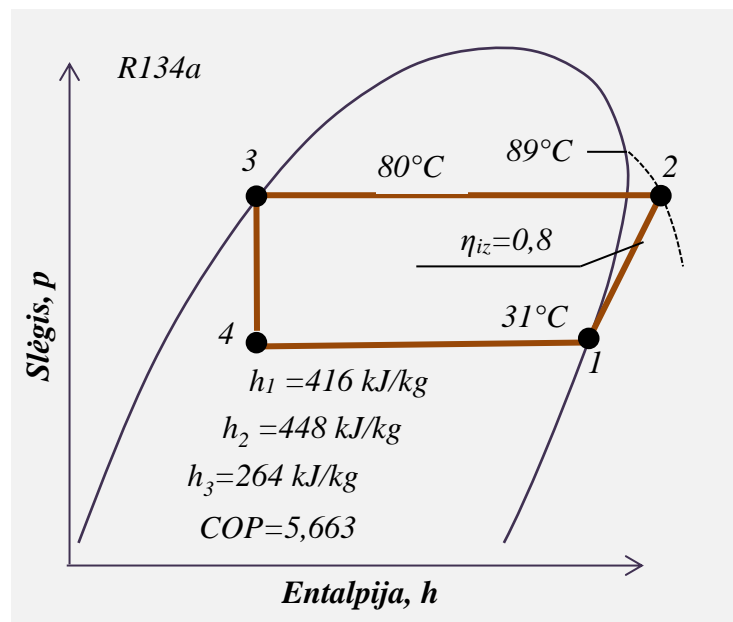
Izoentropinį kompresoriaus koeficientą priėmę 0,8, iš balanso lygties galime rasti entalpiją antrame ciklo taške:

$$\eta_{iz} \cdot (h_2 - h_1) = h_{2s} - h_1$$

$$h_2 = \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_{iz}} + h_1 = \frac{441,79 - 415,71}{0,8} + 415,71 = 448,31 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (17)$$

Turint visų taškų entalpijas galime suskaičiuoti tokio ciklo transformacijos koeficientą:

$$COP = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} = \frac{448,31 - 263,71}{448,31 - 415,71} = 5,663 \quad (18)$$



16 pav. Šilumos siurblio COP transformuojant visą ciklo atliekinę šilumą

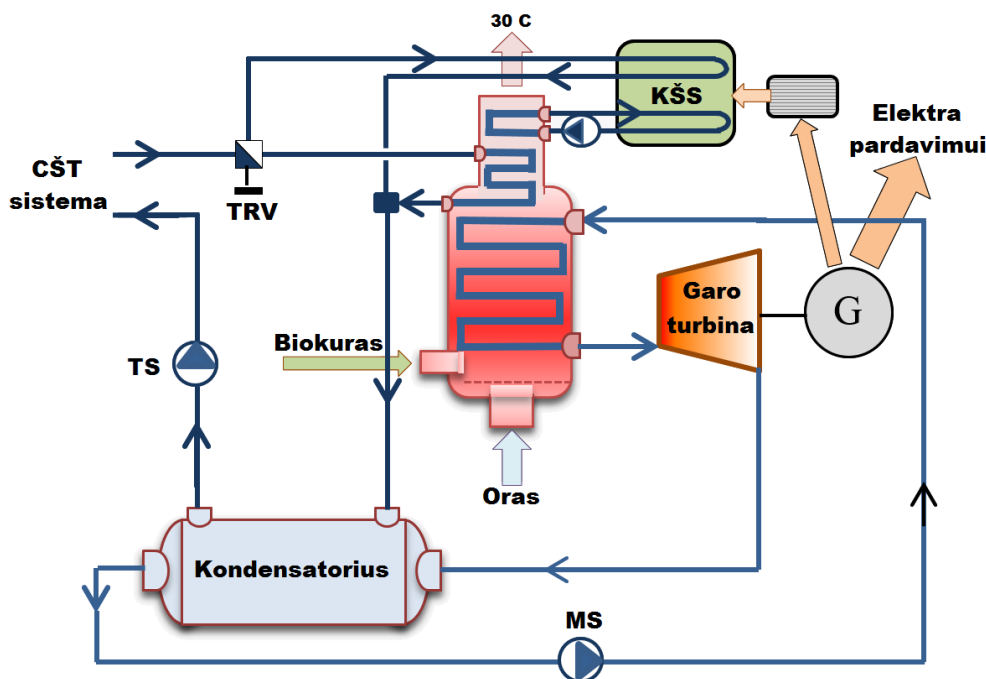
Paprastai aušinimo bokšte prarandama šiluma dabar yra transformuojama į tinkamą CŠT su nedideliu šilumos kiekio prieaugiu.

$$Q_T = \frac{COP \cdot Q_1}{COP - 1} = \frac{5,663 \cdot 16,835}{5,663 - 1} = 20,445 \text{ MW}_t \quad (19)$$

2.3 Biokuro kogeneracinė jėgainė su šilumos siurbliu papildomam šilumos atgavimui iš dūmų

Šilumos siurblys skirtas transformuoti visą jėgainės atliekinę šilumą privalės būti kelių megavatų galios. Jis sunaudos didžiąją dalį generatoriaus pagamintos elektros energijos, kuri yra brangesnis produktas nei šiluma, ypač su valstybės skiriamais papildomais tarifais. Taip pat tokios galios agregatas pareikalaus daug papildomų investicinių kaštų su kuriais ateis ir išaugusių eksploatacinių išlaidų našta.

Norint išvengti šių trūkumų šilumos siurblių integruojame kitoje jėgainės vietoje. Ekonomaizeryje dūmų atvėsinimas yra griežtai reguliuojamas iš tinklų grįžtančio termofikacinio vandens temperatūros. Vidutinė dūmų už ekonomaizerio temperatūra yra apie 50 °C. Kadangi tokios būsenos dūmuose yra dar ganėtinai daug nesusikondensavusių vandens garų, šilumos siurblio pagalba atvėsindami juos iki maždaug 30 °C galime išgauti santykinai daug šilumos. Ją vėliau transformuosime iki šiek tiek didesnės nei grįžtančio termofikacinio vandens temperatūros, kas lems ypatingai mažą temperatūrų skirtumą tarp šilumos siurblio garintuve ir kondensatoriuje cirkuliuojančio agento. Aukšto COP ir nedaug elektros energijos vartojantis šilumos siurblys pagamins mažiau šilumos, tačiau kainuos keletą kartų mažiau nei anksčiau nagrinėtas variantas.



17 pav. Šilumos siurblio papildomam dūmų atvėsinimui schema

Termodinaminis ciklas išlieka toks pat kaip įprastinėje biokuro kogeneracinėje jėgainėje, tad belieka paskaičiuoti papildomą šilumos kiekį atgautą ataušinant dūmus už ekonomizerio ir šilumos siurblio COP.

Kaip ir skaičiuojant ekonomizerio galią, iš (12 pav.) randame papildomai atgautos šilumos koeficientą pagal VŠV, kondensuojant dūmus už ekonomizerio. Jei deginamas biokuras 50 % drėgnumo ir dūmus atvėsiname iki 30 °C temperatūros, šis koeficientas yra lygus 0,23. Tai net 7% papildomos šilumos (ją dar reikės transformuoti), kuri įprastiniu atveju patenka į atmosferą.

Dabar galime lengvai suskaičiuoti žemo potencialo šilumos kiekį:

$$Q_{\dot{z}} = Q_{disp}^{VŠV} \cdot (0,23 - 0,16) = 27,984 \cdot (0,23 - 0,16) = 1,959 \text{ MW}_t \quad (20)$$

Šilumos siurblio garintuve esančio agento virimo temperatūra priimama 4 oC žemesnė nei temperatūra iki kurios siekiame ataušinti išeinančius dūmus; $t_o = 26 \text{ }^\circ\text{C}$. Garų kondensacijos temperatūrą priimame 5 °C aukštesnę už iš tinklų grįžtančio termofikacinio vandens temperatūrą, t.y., $t_k = 50 \text{ }^\circ\text{C}$. Taip pat, kaip ir anksčiau, įsiurbimo temperatūra yra 3 oC aukštesnė, $t_o' = 29 \text{ }^\circ\text{C}$. Naudojantis programa „COOLPACK“ surandame transformacijos koeficientą.

Slėgis garintuve yra funkcija $p(t_o)$, todėl $p_o = 6,853 \text{ bar}$;

Turint agento virimo temperatūrą ir jo slėgį garintuve randame pirmojo ciklo taško (būsena prieš kompresorių) entalpiją ir entropiją: $h_1 = 414,66 \text{ kJ/kg}$, $s_1 = 1721,84 \text{ J/kg K}$;

Suspausto garo entropija s_{2s} yra lygi garų entropijai prieš kompresorių, neįvertinus kompresoriaus izoentropinio koeficiento: $s_{2s} = s_1 = 1721,84 \text{ J/kg K}$;

Slėgis siurblio kondensatoriuje yra funkcija $p(t_k)$, todėl $p_k = 13,176 \text{ bar}$;

Taško 2s temperatūra randama pagal kondensacijos slėgį ir entropiją s_{2s} , $t_{2s} = 54,56 \text{ }^\circ\text{C}$, o turint šią temperatūrą randame ir šio taško entalpiją $h_{2s} = 428,23 \text{ kJ/kg}$;

Taške 3 agentas yra sotaus skysčio būsenoje. Jo entalpija šiuo atveju priklauso nuo iš tinklų grįžtamos temperatūros, kuri vienoda visiems variantams - 45 °C; $h_3 = 263,71 \text{ kJ/kg}$;

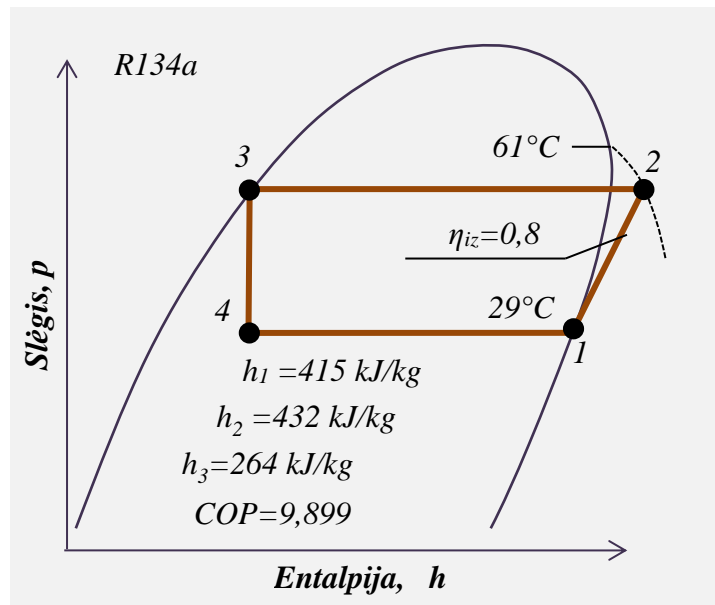
Izoentropinį kompresoriaus koeficientą priėmę 0,8, iš balanso lygties galime rasti entalpiją antrame ciklo taške:

$$\eta_{iz} \cdot (h_2 - h_1) = h_{2s} - h_1$$

$$h_2 = \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_{iz}} + h_1 = \frac{428,23 - 414,66}{0,8} + 414,66 = 431,623 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (21)$$

Turint visų taškų entalpijas galime suskaičiuoti tokio ciklo transformacijos koeficientą:

$$COP = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} = \frac{431,623 - 263,71}{431,623 - 414,66} = 9,899 \quad (22)$$



188 pav. KŠS ciklas naudojamas papildomai šilumai iš dūmų atgauti

Šilumos siurblio darbui tokios sąlygos yra itin palankios, kas atsispindi ir COP. Transformacijos koeficientas leidžia rasti visą siurblyje paruošto vandens šilumos kiekį:

$$Q_T = \frac{COP \cdot Q_1}{COP - 1} = \frac{9,899 \cdot 1,959}{9,899 - 1} = 2,179 \text{ MW}_t \quad (23)$$

3. EKONOMINĖ ANALIZĖ

3.1 Įprastinė biokuro kogeneracinė jėgainė

Biokuro kogeneracinės jėgainės investiciniai kaštai vadovaujantis duomenimis iš tarptautinės energetikos agentūros pateiktos publikacijos [20] yra nuo 1000 USD/kW_e iki 5000 USD/kW_e. Savo skaičiavimuose priimame 3000 €/kW_e. Tokiu atveju jėgainė kainuotų (3000×5000=) 15 M €.

Kadangi elektra savo reikmėms ir išlaidos kuriai bus skaičiuojamos atskirai, pastoviasias ir kintamas išlaidas priimame atitinkamai 3 ir 4 procentus. Jos per metus pareikalaus:

$$m_p = 15 \cdot 0,03 = 0,45 \text{ M €} = 450 \text{ tūkst €}$$

$$m_k = 15 \cdot 0,04 = 0,6 \text{ M €} = 600 \text{ tūkst €}$$

Pagal 2016 m., gruodžio 30 dienos Lietuvos Respublikos energetikos ministro įsakymą [22] maksimali valstybės parama tokiam projektui siekia 4 mln., €. Centralizuotos šilumos tiekimas ir elektros gamyba, pažangiausių technologijų jėgainėje deginančioje biokurą, leistų tikėtis didžiausios galimos paramos. Tad skaičiavimuose priimsime jog iš valstybės gauname 4 mln., €.

Banko paskola imama 25 metams su 7 % palūkanomis. Kasmetinės išlaidos paskolai skaičiuojamos (atėmus gautą paramą iš valstybės) pagal tokią formulę:

$$A = P \left[\frac{j(1+j)^n}{j(1+j)^n - 1} \right] = 11 \text{ M€} \left[\frac{0,07 \cdot (1+0,07)^{25}}{(1+0,07)^{25} - 1} \right] = 0,944 \text{ M €} = 944 \text{ tūkst €} \quad (24)$$

Kita išlaidų eilutė sudaro didžiausiu kasmetinius kaštus. Turint reikalingą gauti šilumos kiekį, išlaidos už biokurą skaičiuojamos paprastai, - biokuro rinkos kaina padauginama iš šilumos kiekio ir jėgainės darbo parų skaičių per metus. Tokios jėgainės gaminama energija yra konkurencinga, tad planuojama dirbti devynis mėnesius per metus (270 dienų). Biokuro biržos praėjusių metų vidutinė kaina pagal [23] siekia apie 140 €/tne., (50 % - SM1; 50 % - SM2).

$$B = \frac{23,715}{11,63} \cdot 270 \cdot 24 \cdot 140 = 1,849 \text{ M €} \quad (25)$$

Taigi visos įprastinės biokuro jėgainės kasmetinės išlaidos sudaro:

$$S = m_p + m_k + A + B = 0,45 + 0,6 + 0,944 + 1,849 = 3,844 \text{ M €} \quad (26)$$

Turbinos galia yra lygi 5 MW_{el}, tačiau ne visa elektros energija yra parduodama. Apie 2% elektros energijos prarandama dėl elektros konversijos nuostolių. Dalis panaudojama savo reikmėms, kadangi tokia elektra yra pigesnė nei perkama iš tinklų. Ją priimame 4 % nuo jėgainės pagamintos elektros.

$$u_e = 5000 \cdot 0,04 = 200 \text{ kW}$$

$$u_g = 5000 \cdot 0,02 = 100 \text{ kW}$$

Visa elektra, kurios lieka ($5000-200-100=4700\text{kW}$) parduodama lengvatiniu, VIAP kompensuojamu tarifu.[lentelė 3]

$$E = 4700 \cdot 270 \cdot 24 \cdot 5,7 = 1,734 \text{ M €}$$

Pajamos už šilumą sudaro kondensatoriaus pagaminama šiluminė energija ir šiluma atgauta iš kondensacinio dūmų ekonomizerio. Šilumos kaina priimama išanalizavus praėjusių metų didmiesčių šilumos supirkimo tarifus priimama 2,5 ct/kWh.

- Pajamos už šilumą iš kondensatoriaus $\check{S}_k = 19,763 \cdot 270 \cdot 24 \cdot 2,5 = 3,202 \text{ M €}$
- Pajamos už šilumą iš ekonomizerio $\check{S}_{EKO} = 4,477 \cdot 270 \cdot 24 \cdot 2,5 = 0,725 \text{ M €}$
- Pajamos už šilumą iš visos jėgainės $\check{S}_{sum} = 3,202 + 0,725 = 3,927 \text{ M €}$

Sudėjus jėgainės gaunamas pajamas už parduodamą elektros ir šilumos energiją gausime bendras visos jėgainės pajamas ($1,734+3,927=5,663 \text{ M€}$). Jų ir visų jėgainės išlaidų santykis parodys metinį projekto pelningumą:

$$J_{kog} = 5,663 \text{ M€} - 3,844 \text{ M€} = 1,819 \text{ M €}$$

3.2 Biokuro kogeneracinė jėgainė su šilumos siurbliu

Jėgainės su šilumos siurbliu ciklo atliekinei šilumai paversti tinkamai naudoti, išlaidos padidėja dėl papildomų investicinių kaštų ir jų pastoviujų išlaidų, taip pat galingas kompresorius suvaratoja daug elektros. Tačiau kitoje medalio pusėje sumažėja išlaidos biokuroi, kadangi pati jėgainė (be šilumos siurblio) yra pusiau kogeneracinė, - sumažėja investiciniai kaštai. Juos priimame 2500€/kW. Į kasmetines išlaidas jėgainės amortizacijai įeina ir šilumos siurblio įranga, todėl iš pradžių reikia įvertinti juos.

Kompresorinis šilumos siurblys iš esmės susidaro iš dviejų tipų įrenginių: tai pats kompresorius, kondensatorius ir garintuvas, kurie abu yra šilumokaičiai su juose vykstančiais labai panašiais šilumos mainais. Tokių šilumokaičių kaina pagal netiesinę lygtį, kurioje kintamasis yra šilumos mainų paviršiaus plotas – A. Literatūroje pateikiamos dvi formulės skirtos skaičiuoti šilumokaičio kainai pagal jo plotą.[24][25]

$$C(USD) = (1 + i)^{\Delta N} \cdot 130 \cdot \left(\frac{A(m^2)}{0,093} \right)^{0,78} \quad (27)$$

$$C(USD) = (1 + i)^{\Delta N} \cdot (8500 + 409 \cdot A^{0,85})^{0,78} \quad (28)$$

Čia C(USD) – šilumokaičio kaina doleriais; i – infliacijos šimtoji procentinė dalis; ΔN – metai nuo minėtos publikacijos paskelbimo (pirmajai priklausomybei $\Delta N=8$, antrajai $\Delta N=4$); A- šilumos mainų paviršiaus plotas, m^2 .

Šilumos mainų paviršiaus plotas apskaičiuojamas įvertinant pernešamos šiluminės galios, šilumos mainų efektyvumo ir vidutinio logaritminio temperatūrų skirtumo tarp abiejų šilumokaičio pusių, santykiu:

$$A = \frac{Q}{k\Delta t} = \frac{Q}{k \cdot \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}} \quad (29)$$

Norint rasti Δt_1 ir Δt_2 reikia įvertinti srautų temperatūrų skirtumus šilumokaičio įtekėjime ir ištekėjime. Kondensatoriaus kondensacijos temperatūra yra 80 °C, o iš tinklų į ją atiteka 40 °C termofikacinis vanduo. Agento garų kondensacija yra izoterminis procesas tad kitame šilumokaičio gale jis išlieka tos pačios temperatūros (80 °C), o termofikacinis vanduo pašyla iki 78 °C. Tad kondensatoriaus $\Delta t_1 = 80 - 40 = 40$ °C, o $\Delta t_2 = 80 - 77 = 3$ °C. Koefficientas k priklauso nuo daugybės faktorių, bet pagrindiniai yra abiejų pusių šilumos atidavimo koeficientai. Pagal [26] vidutinė k reikšmė yra apie 800 W/m² K. Šiluminė kondensatoriaus galia imama iš ankstesnių skaičiavimų, $Q = 20,445$ MW.

$$A_k = \frac{Q}{k\Delta t} = \frac{Q_T}{k \cdot \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}} = \frac{20,445}{800 \cdot \frac{40 - 3}{\ln \frac{40}{3}}} = 1789,122 \text{ m}^2 \quad (30)$$

Garintuvo virimo temperatūra yra 26 °C, garų įsiurbimo prieš kompresorių temperatūra – 29 °C. Iš turbinos išėjusio atidirbusio vandens garo kondensacijos procesas yra izoterminis, kurio temperatūra atitinka 33 °C ir ji išlieka pastovi visame šilumokaityje. Garintuvo $\Delta t_1 = 33 - 26 = 7$ °C, o $\Delta t_2 = 33 - 29 = 4$ °C. Šiluminė garintuvo galia $Q = 16,835$, kuri atitinka žemo potencialo šilumos šaltinio galią.

$$A_g = \frac{Q}{k\Delta t} = \frac{Q}{k \cdot \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}} = \frac{16,835}{800 \cdot \frac{5 - 2}{\ln \frac{5}{2}}} = 2844,169 \text{ m}^2 \quad (31)$$

Apskaičiavus šilumokaičių plotus galime rasti jų kainą. Skaičiuosime pagal abi pateiktas priklausomybes, o gautų kainų vidurkis bus priimamas kaip galutinė jo kaina:

$$C(USD) = (1 + i)^{\Delta N} \cdot 130 \cdot \left(\frac{A(m^2)}{0,093} \right)^{0,78} = (1 + 0,025)^8 \cdot 130 \cdot \left(\frac{1789,122}{0,093} \right)^{0,78} = \quad (32)$$

$$= 347\,842 \text{ USD} = 313 \text{ tūkst } €$$

$$C(USD) = (1 + i)^{\Delta N} \cdot (8500 + 409 \cdot A^{0,85})^{0,78} = \quad (33)$$

$$= (1 + 0,025)^4 \cdot (8500 + 409 \cdot 1789,122^{0,95})^{0,78} = 115\,946 \text{ USD} = 104 \text{ tūkst } €$$

Kondensatoriaus kainų vidurkis: $313,058 + 104,352 = 209$ tūkst. €. Ta pati skaičiavimų seka galioja ir garintuvo kainai nustatyti:

$$C(USD) = (1 + i)^{\Delta N} \cdot 130 \cdot \left(\frac{A(m^2)}{0,093} \right)^{0,78} = (1 + 0,025)^8 \cdot 130 \cdot \left(\frac{2844,169}{0,093} \right)^{0,78} = \quad (34)$$

$$= 452\,427\,USD = 407\,tūkst\,€$$

$$C(USD) = (1 + i)^{\Delta N} \cdot (8500 + 409 \cdot A^{0,85})^{0,78} = \quad (35)$$

$$= (1 + 0,025)^4 \cdot (8500 + 409 \cdot 2844,169^{0,95})^{0,78} = 167\,423\,USD = 151\,tūkst\,€$$

Garintuvo kainų vidurkis: $407,185 + 150,680 = 279$ tūkst. €

Toliau skaičiuojame kompresoriaus kainą. Ji randama pasitelkus netiesinę funkciją priklausančią nuo kompresoriaus mechaninės galios:

$$C_{com} = 91\,562 \cdot \left(\frac{W}{445} \right)^{0,67} \cdot (1 + i)^{\Delta N} \quad (36)$$

Mechaninę kompresoriaus galią randame labai paprastai. Iš šilumos kiekio, kurį gavome transformavę žemo potencialo šilumą reikia atimti garintuvo šiluminę galią. Tai bus mechaninis kompresoriaus darbas, kuri siurblio darbo metu beveik visa virsta šiluma atiduodama spaudžiamam agentui:

$$W = W_{kond} - W_{gar} = 20,445 - 16,835 = 3,61\,MW \quad (37)$$

$$C_{com} = 91\,562 \cdot \left(\frac{W}{445} \right)^{0,67} \cdot (1 + i)^{\Delta N} = 91\,562 \cdot \left(\frac{3,61}{445} \right)^{0,67} \cdot (1 + 0,025)^4 = \quad (38)$$

$$= 424\,720\,USD = 382\,tūkst\,€$$

Investiciniai jėgainės kaštai yra 2500 €/kW. Valstybės parama priimama tokia pati, tad suminiai kompresorinio šilumos siurblio ir jėgainės investiciniai kaštai:

$$P = 5000 \cdot 2500 - 4\,000\,000 + C_{kond} + C_{gar} + C_{com} = \quad (39)$$

$$= 5000 \cdot 2500 - 4\,000\,000 + 208\,705 + 278\,933 + 382\,248 = 9,370\,M\,€$$

Puikiai matome tokios jėgainės pranašumą – mažesnę jos kainą. Tai be abejonės atsilies ir kasmetinėse išlaidose paskolos grąžinimui:

$$A = P \left[\frac{j(1 + j)^n}{j(1 + j)^n - 1} \right] = 9,370\,M\,€ \left[\frac{0,07 \cdot (1 + 0,07)^{25}}{(1 + 0,07)^{25} - 1} \right] = 0,804\,M\,€ = 804\,tūkst\,€ \quad (40)$$

Kadangi šios jėgainės termodinaminis garo ciklas yra didesnio efektyvumo, pasiekti užsiduotai 5 MW elektrinei galiai reikia mažiau šilumos. Pastaroji tiesiogiai proporcinga sudeginto kuro kiekiui; jį padauginus iš kuro kainos gauname išlaidas biokurui

$$B = \frac{20,202}{11,63} \cdot 270 \cdot 24 \cdot 140 = 1,576\,M\,€$$

Kompresoriaus ir jėgainės pastoviosios išlaidos, skirtumui tarp jų matyti, paskaičiuojamos atskirai, po 3 % kiekvienam. Kintamos išlaidos skaičiuojamos tik jėgainei (4 %), nes kompresoriaus elektros suvartojimas bus atimamas iš turbinos pagaminto elektros kiekio.

$$m_{pj} = 12,5 \cdot 0,03 = 0,375 \text{ M €} = 375 \text{ tūkst €}$$

$$m_{pk} = 0,89 \cdot 0,03 = 0,026 \text{ M €} = 261 \text{ tūkst €}$$

$$m_k = 12,5 \cdot 0,04 = 0,5 \text{ M €} = 500 \text{ tūkst €}$$

Visos kogeneracinės jėgainės su šilumos siurbliu išlaidos sudėjus:

$$S = m_{pj} + m_{pk} + m_k + A + B = 0,375 + 0,026 + 0,5 + 0,804 + 1,576 = 3,281 \text{ M €} \quad (41)$$

Elektros sąnaudos jėgainės darbui palaikyti bei generavimo nuostoliai turbinos generatoriuje išlieka tokie pat. Šiuo atveju didžiąją dalį elektros energijos sunaudos galingas šilumos siurblio kompresorius. Kompresoriaus elektrinė galia yra lygi jo mechaninei galiai įvertinus trinties (3 %) ir elektrinius nuostolius (2 %):

$$W_{el} = W \cdot (1 + 0,03) \cdot (1 + 0,02) = 3,61 \cdot (1 + 0,03) \cdot (1 + 0,02) = 3,793 \text{ MW} \quad (42)$$

$$u_e = 5000 \cdot 0,04 = 200 \text{ kW}$$

$$u_g = 5000 \cdot 0,02 = 100 \text{ kW}$$

Pilną jėgainės ir šilumos siurblio elektros suvartojimą atėmę iš generuojamų 5 MW gausime elektros likutį pardavimui ($5000 - 200 - 100 - 3793 = 907 \text{ kW}$). Pajamos už metinius elektros pardavimus:

$$E = 907 \cdot 270 \cdot 24 \cdot 5,7 = 0,335 \text{ M €} = 335 \text{ tūkst €}$$

Stipriai sumažėjęs parduodamos elektros kiekis pagal idėjos teoriją bus kompensuojamas šilumos siurblio pagamintu didesniu šilumos kiekiu. Visa iš turbinos išėjusio atidirbusio garo šiluma su papildoma šiluma iš kompresoriaus yra transformuojama į tinkamą naudoti. Pajamos iš šilumos siurblio kondensatoriaus pagamintos šilumos:

$$\check{S}_{\check{S}} = Q_T \cdot 270 \cdot 24 \cdot 2,5 = 20,445 \cdot 270 \cdot 24 \cdot 2,5 = 3,312 \text{ M €} \quad (43)$$

Pajamos iš ekonomizaizerio atgautos slaptosios dūmų šilumos dėl mažesnio sudeginto kuro kiekio taip pat bus šiek tiek mažesnės:

$$\check{S}_{EKO} = Q_{EKO} \cdot 270 \cdot 24 \cdot 2,5 = 3,814 \cdot 270 \cdot 24 \cdot 2,5 = 0,618 \text{ M €} = 618 \text{ tūkst €} \quad (44)$$

$$\text{Pajamos už šilumą iš visos jėgainės } \check{S}_{sum} = \check{S}_{\check{S}} + \check{S}_{EKO} = 3,312 + 0,618 = 3,930 \text{ M €} \quad (45)$$

Visi šie ekonominiai skaičiavimai galiausiai parodo jėgainės pelną, kuris iš esmės yra pagrindinis projekto naudingumo rodiklis:

$$J_{\check{S}} = 3,930 \text{ M €} + 0,335 \text{ M €} - 3,281 \text{ M €} = 0,984 \text{ M €}$$

3.3 Biokuro kogeneracinė jėgainė su šilumos siurbliu papildomam šilumos atgavimui iš dūmų

Trečiasis jėgainės tipas pagrįstas papildomu dūmų ataušiniu po kondensacinio ekonomizerio. Pasirinktas dūmų ataušinio laipsnis (nuo 50 °C iki 30 °C) duoda santykinai nedaug šilumos, tačiau šilumos siurblio COP, dėl mažo temperatūrų skirtumo tarp žemo ir aukšto potencialo taškų yra itin geras. Nedideliame šilumos kiekiui transformuoti su aukštu šilumos siurblio COP pakanka kelių šimtų kilovatų elektros. Tokie elektros energijos kiekiai pramonės srityje yra laikomi įprasti. Tokios įrangos priedas biokuro kogeneracinei jėgainei yra kaip vienas iš būdų padidinti jos energijos utilizavimo koeficientą.

Jėgainės garo ciklas išlieka nepakeistas. Turbinos užduotoji nominali galia taip pat, tad pati jėgainė, be KŠS, kainuoja tiek ir pirmajame variante, - 15 M €. Jos pastoviosios ir kintamos išlaidos atitinkamai 0,45 M €, 0,6 M €. Išlaidos biokuroi – 1,850 M €.

Kasmetinių išlaidų eilutę įtakoja šilumos siurblio įrangos kaštai. Pagal antrame variante naudotą metodiką ieškome kondensatoriaus, garintuvo ir kompresoriaus kainų:

Siurblio kondensatoriaus ir garintuvo kainai rasti reikia žinoti jų šilumos mainų plotą:

$$A = \frac{Q}{k\Delta t} = \frac{Q}{k \cdot \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}} \quad (46)$$

Kondensacijos temperatūra šilumos siurblio kondensatoriuje yra 50 °C. Grįžtančio iš tinklų termofikacinio vandens temperatūra sezono metu svyruoja, tačiau darbe ji priimame vienoda, t.y., 40°C. Abiejuose šilumokaičio galuose kondensacijos temperatūra išlieka pastovi, o termofikacinis vandens numatomas pašildymas siekia 46 °C. Iš čia $\Delta t_1 = 50 - 40 = 10$ °C, o $\Delta t_2 = 50 - 46 = 4$ °C.

$$A_k = \frac{Q}{k\Delta t} = \frac{Q_T}{k \cdot \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}} = \frac{2,179}{800 \cdot \frac{10 - 4}{\ln \frac{10}{4}}} = 415,958 \text{ m}^2 \quad (47)$$

Garintuvo šilumokaičiuje dūmai atvėsunami nuo 50 °C iki 30 °C. Dūmų šiluma sunaudojama išgarinti cirkuliuojančiam agentui, kuris sotaus skysčio būsenoje yra 26 °C, o virtęs garais, prieš įsiurbimą į kompresorių pašyla iki maždaug 29 °C. $\Delta t_1 = 50 - 26 = 24$ °C, o $\Delta t_2 = 30 - 29 = 1$ °C. Garintuvo plotas:

$$A_g = \frac{Q}{k\Delta t} = \frac{Q}{k \cdot \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}} = \frac{1,959}{800 \cdot \frac{24 - 1}{\ln \frac{24}{1}}} = 338,359 \text{ m}^2 \quad (48)$$

Palyginimui tokios jėgainės kondensacinio ekonomizerio šilumos mainų paviršiaus plotas būtų apie 1500 m². Rastus kondensatoriaus ir garintuvo plotus įstatome į šilumokaičių kainos priklausomybes, kurių vidurkis apsprendžia galutinę kiekvieno jų kainą:

$$C(USD) = (1 + i)^{\Delta N} \cdot 130 \cdot \left(\frac{A(m^2)}{0,093} \right)^{0,78} = (1 + 0,025)^8 \cdot 130 \cdot \left(\frac{415,958}{0,093} \right)^{0,78} = \quad (49)$$

$$= 111\,475\,USD = 100\,tūkst\,€$$

$$C(USD) = (1 + i)^{\Delta N} \cdot (8500 + 409 \cdot A^{0,85})^{0,78} = \quad (50)$$

$$= (1 + 0,025)^4 \cdot (8500 + 409 \cdot 415,958^{0,95})^{0,78} = 40\,218\,USD = 36\,tūkst\,€$$

Galutinė kondensatoriaus kaina: 100,327 + 36,196 = 68 tūkst. €. Garintuvo kaina bus mažesnė dėl didesnio logaritminio temperatūrų skirtumo. Lygiagrečiai garintuvo plotas irgi bus mažesnis, o jis yra vienintelis kintamasis skaičiuojant kainą.

$$C(USD) = (1 + i)^{\Delta N} \cdot 130 \cdot \left(\frac{A(m^2)}{0,093} \right)^{0,78} = (1 + 0,025)^8 \cdot 130 \cdot \left(\frac{338,359}{0,093} \right)^{0,78} = \quad (51)$$

$$= 85\,968\,USD = 77\,tūkst\,€$$

$$C(USD) = (1 + i)^{\Delta N} \cdot (8500 + 409 \cdot A^{0,85})^{0,78} = \quad (52)$$

$$= (1 + 0,025)^4 \cdot (8500 + 409 \cdot 338,359^{0,95})^{0,78} = 35\,255\,USD = 32\,tūkst\,€$$

Galutinė garintuvo kaina: 77,371 + 31,729 = 55 tūkst. €.

Liko suskaičiuoti kompresoriaus kainą. Ji randama naudojant tą pačią netiesinę funkciją, kurioje kompresoriaus kaina priklauso nuo kompresoriaus mechaninės galios.

Didelis transformacijos koeficientas reiškia, kad kompresorius dirba efektyviai ir lengvai. Kuo didesnis COP, tuo mažiau kaštų reikalauja santykinis šilumos transformavimo vienetas.

$$W = W_{kond} - W_{gar} = 2,179 - 1,959 = 220\,kW$$

Kompresoriaus kaina pagal tokią mechaninę galią:

$$C_{com} = 91\,562 \cdot \left(\frac{W}{445} \right)^{0,67} \cdot (1 + i)^{\Delta N} = 91\,562 \cdot \left(\frac{0,22}{445} \right)^{0,67} \cdot (1 + 0,025)^4 = \quad (53)$$

$$= 65\,162\,USD = 59\,tūkst\,€$$

Investiciniai jėgainės kaštai yra 15 M €. Prie šios sumos reikia pridėti kompresorinio šilumos siurblio įrangos kainą:

$$P = 15\,M\,€ - 4\,M\,€ + C_{kond} + C_{gar} + C_{com} = \quad (54)$$

$$= 15\,000\,000 - 4\,000\,000 + 68\,262 + 54\,550 + 58\,646 = 11,182\,M\,€$$

Menka papildoma investicija, padalinta per 25 metų laikotarpį, beveik nepasijaus kasmetinėse išlaidose dėl banko paskolos:

$$A = P \left[\frac{j(1+j)^n}{j(1+j)^n - 1} \right] = 11,182 \text{ M€} \left[\frac{0,07 \cdot (1+0,07)^{25}}{(1+0,07)^{25} - 1} \right] = 0,959 \text{ M€} = 959 \text{ tūkst €} \quad (55)$$

Sudėjus visus pinigus sumokamus dėl įsipareigojimų bankui, išlaidas už paslaugas ir atsidėjimą jėgainės amortizacijai gauname galutinę planuojamą metinių išlaidų eilutę:

$$S = m_p + m_k + A + B = 0,45 + 0,6 + 0,959 + 1,849 = 3,865 \text{ M€} \quad (56)$$

Kogeneracinės jėgainės elektros sąnaudoms įvertinti tereikia papildomai apskaičiuoti šilumos siurblio kompresoriaus sunaudojamą elektros energiją. Be KŠS jėgainės sąnaudos savoms reikmės bei generavimo nuostoliai yra tie patys – $200 + 100 = 300 \text{ kW}$. Kadangi kompresorius yra mažesnės galios, jo trinties ir elektrinius nuostolius priimame šiek tiek didesnius, 3.5 % ir 2,5 %:

$$W_{el} = W \cdot (1 + 0,035) \cdot (1 + 0,025) = 0,22 \cdot (1 + 0,035) \cdot (1 + 0,025) = 233 \text{ kW} \quad (57)$$

Į tinklus tiekiamos (parduodamos) elektros energijos kiekis ($5000 - 300 - 233 = 4467 \text{ kW}$), kaip prioritetas, išlieka pakankamai aukštas, skirtingai nei antrajame variante.

Pajamos už elektros energiją jėgainėje su KŠS papildomam dūmų ataušinimui:

$$E = 4467 \cdot 270 \cdot 24 \cdot 5,7 = 1,650 \text{ M€}$$

Šilumos siurblys neįtakoja pajamų už šilumą gautą iš jėgainės kondensatoriaus ir ekonomizerio. Transformuota dūmų šiluma sukuria $2,179 \text{ MW}_T$, kuri verta:

- Pajamos už šilumą iš KŠS $\check{S}_{K\check{S}} = 2,179 \cdot 270 \cdot 24 \cdot 2,5 = 0,353 \text{ M€} = 353 \text{ tūkst €}$
- Pajamos už šilumą iš visos jėgainės $\check{S}_{sum} = 3,202 + 0,725 + 0,353 = 4,280 \text{ M€}$
- Jėgainės pajamų ir išlaidų balansas $J_{K\check{S}} = 1,734 + 4,280 - 3,865 = 2,065 \text{ M€}$

3.4 Ekonominės analizės apibendrinimas ir rezultatų palyginimas

Lentelė 4. Ekonominių rodiklių suvestinė

	Iprastinė biokuro kogeneracinė jėgainė	Biokuro kogeneracinė jėgainė su šilumos siurbliu	Kompresorinis šilumos siurblys vien papildomos šilumos atgavimui	KŠS papildomos šilumos atgavimui blogiausiomis sąlygomis
Projekto kaina	11	9,370	11,182	11,368
η_T / COP	0,253	0,297 / 5,663	0,253 / 9,899	0,253 / 7,638
Kasmetinės išlaidos	0,944	0,804	0,959	0,975
Išlaidos biokurui	1,850	1,576	1,850	1,850
Bendros išlaidos	3,844	3,281	3,865	3,886
Elektros likutis pardavimui	4700	907	4467	4378
Pajamos už elektrą	1,734	0,335	1,650	1,617
Šilumos kiekis pardavimui	24,240	24,259	26,419	26,494
Pajamos už šilumą	3,927	3,930	4,280	4,292
Metinis pelnas	1,819	0,984	2,065	2,023
Pelno pokytis	0	- 45,9	+13,51	+11,19

IŠVADOS

Išanalizuota tarptautinė elektros rinka, Lietuvos energetikos sektoriaus dabartinė padėtis bei ateities vizijos pagrindžia atsinaujinančių energijos išteklių ir vietinės elektros energijos gamybos pajėgumų būtinumą. Kogeneracinė biokuro jėgainė ne tik, kad apjungia šiuos kriterijus, bet papildomai tiekia šilumą į miesto CŠT. Siekiant padidinti tokios jėgainės energetinį efektyvumą ir pelną, išanalizuotos galimybės į ją integruoti kompresorinį šilumos siurblių.

Darbe šilumos siurblio technologija buvo įgyvendinta dviem skirtingais būdais. Pirmasis - visos garo ciklo atliekinės šilumos transformavimas, antrasis – transformuoti tik papildomai atgautą šilumą iš dūmų po ekonomizerio. Idėjų naudai pasverti, skaičiavimai palyginti su įprastinės biokuro kogeneracinės jėgainės pagrindiniais parametrais. Gauti rezultatai parodė jog šilumos siurblys naudojamas visai garo ciklo atliekinei šilumai transformuoti yra per daug galingas, ko pasekoje dideli kompresoriaus ir kitos įrangos investiciniai kaštai, bei ženkliai padidėjusios elektros sąnaudos nusveria papildomas pajamas. Kita vertus kompresorinis šilumos siurblys tik papildomai atgautai dūmų šilumai transformuoti yra nepalyginamai mažesnis ir visi pastarojo varianto minusai jam negalioja. Nors papildomas šilumos kiekis nėra didelis, tokios jėgainės metinis pelnas išauga 13,5 % (266 tūkst. €), lyginant su įprastine biokuro kogeneracine jėgaine. Tokio KŠS įrangos kaina nedidelė, todėl nereikalauja ieškoti didelių investuotojų.

Tikslesniam projekto įvertinimui reikėtų atlikti daugiau KŠS įtakos jėgainės darbui skaičiavimų, - kamino traukos pokyčio, garintuvo slėgio nuostolių dūmų kanale, vandens srautų išskyrimo į ekonomizerį ir siurblio kondensatorių, bei technologinio įrangos išpildymo.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. <http://www-tandfonline-com.ezproxy.ktu.edu/doi/pdf/10.1080/10789669.2014.900315>
2. <http://jbb.avestia.com/2014/004.html>
3. https://www.pssurvival.com/PS/Gasifiers/Cogeneration_From_Biofuels_A_Technical_Guid_ebook_1986.pdf
4. <http://www.scrigroup.com/limba/lituaniana/271/Elektros-sistemas-ir-elektrins45866.php>
5. <http://www.regula.lt/en/Pages/Electricity.aspx>
6. <http://www.regula.lt/elektra/Puslapiiai/elektros-rinkos-apzvalga/rinkos-stebesena.aspx>
7. <http://www.litgrid.eu/index.php/energetikos-sistema/elektros-energetikos-sistemas-informacija/elektros-gamybos-ir-vartojimo-balanso-duomenys/2287>
8. <http://energetikosabc.lt/lt/elektra/kaip-vyksta-prekyba-elektros-birzoje/89>
9. <http://energetikosabc.lt/lt/elektra/is-ko-susideda-elektros-rinkos-kaina/35>
10. <http://www.litgrid.eu/index.php/elektros-rinka/elektros-rinka/is-ko-susideda-elektros-kaina/2667>
11. <http://www.regula.lt/elektra/Puslapiiai/viesuosius-interesus-elektros-energetikos-sektoriuje-atitinkancios-paslaugos.aspx>
12. <http://www.code2-project.eu/wp-content/uploads/D5.1-Cogeneration-raodmap-NPMS-LT-2014-12-31.pdf>
13. <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S0360544213003964>
14. <http://www-tandfonline-com.ezproxy.ktu.edu/doi/pdf/10.1080/10789669.2014.900315>
15. „ScienceDirect“ straipsnių talpykla – „Load forecasting and dispatch optimisation for decentralised co-generation plant with dual energy storage.“ 2016m. Michael Short, Tracey Crosbie, Muneeb Dawood, Nashwan Dawood.
16. „ScienceDirect“ straipsnių talpykla – „Combination of thermochemical energy storage and small pressurized water reactor for cogeneration system.“ 2015m. Hirokazu Ishitobi, Junichi Ryu, Yukiata Kato.
17. „ScienceDirect“ straipsnių talpykla – „A novel method for finding the optimal heat storage tank capacity for a cogeneration power plant 2014m. Stjepko Katulic, Mislav Čehil, Željko Bogdan.
18. <http://www.bios-bioenergy.at/en/electricity-from-biomass/steam-turbine.html>
19. <http://www.woodenergy.com/media/121299/wood-energy-biomass-chp-v-1.pdf>

20. <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/essentials3.pdf>
21. <http://www.regula.lt/atsinaujinantys-istekliai/Puslapiai/tarifai-2014%E2%80%932015-metais.aspx>
22. Lietuvos Respublikos energetikos ministro įsakymas dėl 2014-2020 metų Europos Sąjungos fondų investicijų veiksmų programos 4 prioriteto „Energijos efektyvumo ir atsinaujinančių išteklių energijos gamybos ir naudojimo skatinimas“ 04.1.1-:VPA-K-110 priemonės „nedidelės galios biokuro kogeneracijos skatinimas“
23. <https://e.baltpool.lt/biomass/?bp=bioprinceforperiod&ti=3487686&oldti=3499347>
24. Arsalis A. 2008. Thermoeconomic modeling and parametric study of hybrid SOFC – gas turbine-steam turbine power plants ranking from 1.5 to 10MWE
25. Sayyaadi H., Mehrabipour R. 2012. Efficiency enhancement of a gas turbine cycle using an optimized turbular recuperative heat exchanger, *Energy*, vol.38, 362-375
26. Cengel Y. A., Ghajar A. 2014. Heat and Mass Transfer. Fundamentals and Applications, 5-th edition, McGraw Hill Education