



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Biomasės dujinimo proceso ir sintezės dujų panaudojimo energijos gamybai analizė

Baigiamasis magistro projektas

Justas Bieliauskas

Projekto autorius

Doc. dr. Egidijus Puida

Vadovas

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Biomasės dujinimo proceso ir sintezės dujų panaudojimo energijos gamybai analizė

Baigiamasis magistro projektas
Termoinžinerija (6211EX023)

Justas Bieliauskas

Projekto autorius

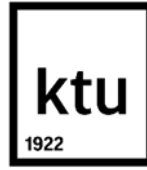
Doc. dr. Egidijus Puida

Vadovas

Prof. habil. dr. Gintautas Miliauskas

Recenzentas

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Justas Bieliauskas

Biomasės dujinimo proceso ir sintezės dujų panaudojimo energijos gamybai analizė

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Justas Bieliauskas

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Studentui (-ei)	Justui Bieliauskui
Projekto tema	<hr/> Biomasės dujinimo proceso ir sintezės dujų panaudojimo energijos gamybai analizė (lietuvių kalba) <hr/> Analysis of the Biomass Gasification Process and Synthesis Gas Use for Energy (anglų kalba) <hr/>
Darbo tikslas ir uždaviniai	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"><p>Projekto tikslas – išanalizuoti biomasės dujinimo procesą bei technologijų galimybes energijos gamybai.</p><p>Uždaviniai:</p><ol style="list-style-type: none">1. išanalizuoti biomasės dujinimo procesą ir technologijas;2. apibrėžti matematinį biomasės dujinimo produktų prognozavimo modelį, kuris leistų pasinaudojant elementine biokuro sudėtimi, nustatyti sintezės dujų komponentų koncentracijas;3. naudojantis modeliu, išanalizuoti biomasės drėgmės kiekio ir dujinimo temperatūros įtaką gaunamų sintezės dujų sudėčiai ir šiluminei vertei;4. atlikti ekonominį biomasės mikro-kogeneracinės dujinimo jėgainės, skirtos verslo objekto energijos tenkinimui analizę.</div>
Reikalavimai ir sąlygos	Apiforminimas pagal bendruosius reikalavimus
Vadovas	Doc. dr. Egidijus Puida 2021-02-10 <hr/> (vadovo pareigos, vardas, pavardė, parašas) (data)

Bieliauskas, Justas. Biomasės dujinimo proceso ir sintezės dujų panaudojimo energijos gamybai analizė. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Egidijus Puida; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Energijos inžinerija.

Reikšminiai žodžiai: biomasė, dujinimas, sintezės dujos, mikro–kogeneracija.

Kaunas, 2021. 72 p.

Santrauka

Augantys švarios ir tvarios energijos poreikiai bei nacionaliniai ir europiniai energetinio nepriklausomumo siekiai skatina ieškoti naujų ir pranašesnių energijos generavimo metodų. Tarp perspektyvių energijos gamybos būdų galima rasti – biomasės dujinimo technologiją. Biomasės dujinimas yra anglies pagrindu sudaryto kuro termocheminė konversija aukštoje temperatūroje, apimanti dalinę kuro elementų oksidaciją. Šio proceso rezultatas – sintetinės (sintezės) dujos (CO_2 , CO , H_2 , CH_4), kurios gali būti plačiai panaudojamos šilumos gamybos, kogeneracijos arba moderniose energijos generavimo sistemose.

Siekiant pažinti biomasės dujinimo technologiją yra įvardinami naudojami išteklių – kuras (biomasė) ir jų potenciali naudojimo plėtra, pagrindinės reakcijos (Boudouard, anglies dujinimo, vandens garų konversijos ir metano susidarymo), procesai (džiovinimas, pirolizė, oksidacija ir anglies dujinimas) bei naudojami įrenginiai ir jų charakteristikos.

Projektuojant dujinimo įrangą arba analizuojant kuro išnaudojimo energijos gamyboje galimybes, atsiranda poreikis nustatyti sintezės dujų struktūrą. Šiuo tikslu, pasiremiant literatūros šaltiniais yra apibrėžiamas termodinaminės pusiausvyros matematinis modelis, kuris naudojantis biomasės elementine kuro sudėtimi, padeda nustatyti sintetines dujas sudarančių komponentų koncentracijas. Pasinaudojant sintezės dujų skaičiavimo kodu, yra tiriama mišrios medienos skiedrų sudėtis: C – 48,77 %, H – 5,85 %, N – 0,05 %, S – 0,01 %, O – 44,52 %, A – 0,8 %. Padarytos CO_2 , CO , H_2 , N_2 , CH_4 koncentracijų kitimo kreivės parodė, jog augant skiedrų drėgmės kiekiui (nuo 0 % iki 25 %) arba dujinimo temperatūrai (nuo 700 °C iki 1100 °C) – degių komponentų koncentracijos (CO , H_2 , CH_4) daugeliu atvejų mažėja, dėl to krenta ir sintezės dujų šiluminė vertė (drėgmės kitimo atveju: nuo 4,22 MJ/Nm^3 iki 3,24 MJ/Nm^3 ; temperatūros kitimo atveju: nuo 4,67 MJ/Nm^3 iki 3,38 MJ/Nm^3).

Trečioje darbo dalyje yra išanalizuotos biomasės dujinimo mikro–kogeneracinės jėgainės projekto ekonominės galimybės. Apskaičiuoti parametrai: vidinė gražos norma – 21 % (diskonto norma – 6 %), grynoji dabartinė vertė – 172 210 Eur, tikrasis atsipirkimo laikas – 5,72 metų, rodo, jog nagrinėta investicija yra rentabili. O atlikta jautrumo analizė, kurios metu buvo keičiamas paramos intensyvumas (nuo 0 % iki 50 %), diskonto norma (nuo 3 % iki 9 %), elektros (nuo 70 Eur/MWh iki 140 Eur/MWh) ir biokuro (nuo 7 Eur/MWh iki 17 Eur/MWh) kainos, atskleidė, jog vienam iš parametru, bloginant projekto ekonominį efektyvumą, daugeliu atvejų jis lieka priimtina įgyvendinti.

Bieliauskas Justas. Analysis of the Biomass Gasification Process and Synthesis Gas Use for Energy. Master's Final Degree Project / supervisor Assoc. prof. dr. Egidijus Puida; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Energy Engineering.

Keywords: biomass, gasification, synthesis gas, micro-cogeneration.

Kaunas, 2021. 72 p.

Summary

The growing demand for clean and sustainable energy, as well as national and European aspirations for energy independence, are encouraging the search for new and superior methods of energy generation. Among the promising ways of energy production can be found – biomass gasification technology. Biomass gasification is the thermochemical conversion of a carbon-based fuel at high temperature, involving the partial oxidation of fuel elements. The result of this process is synthetic (synthesis) gas (CO_2 , CO , H_2 , CH_4), which can be widely used in heat production, cogeneration or modern energy generation systems.

In order to get acquainted with biomass gasification technology, biomass and its potential use development, main reactions (Boudouard, coal gasification, water vapor conversion and methane formation), processes (drying, pyrolysis, oxidation and carbon gasification) and equipment with characteristics are defined.

When designing gasification equipment or analyzing the possibilities of fuel utilization in energy production, there is a need to determine the structure of synthesis gas. For this purpose, based on literature sources, a mathematical model of thermodynamic equilibrium is defined, which, using the elemental fuel composition of biomass, helps to determine the concentrations of components forming synthetic gases. Using the synthesis gas calculation code, the composition of mixed wood chips is investigated: C – 48,77 %, H – 5,85 %, N – 0,05 %, S – 0,01 %, O – 44,52 %, A – 0,8 %. The curves of CO_2 , CO , H_2 , N_2 , CH_4 concentrations showed that with increasing moisture content of wood chips (from 0% to 25%) or gasification temperature (from 700 °C to 1100 °C) – concentrations of flammable components (CO , H_2 , CH_4) in most cases it decreases, which also reduces the calorific value of the synthesis gas (in case of moisture change: from 4,22 MJ/Nm^3 to 3,24 MJ/Nm^3 ; in case of temperature change: from 4,67 MJ/Nm^3 to 3,38 MJ/Nm^3).

In the third part of the work, the economic possibilities of the biomass gasification micro-cogeneration power plant project are analyzed. The calculated parameters: internal rate of return – 21% (discount rate – 6%), net present value – 172,210 Eur, actual payback period – 5,72 years, show that the examined investment is effective. Sensitivity analysis, during which the support intensity (from 0% to 50%), discount rate (from 3 % to 9 %), electricity (from 70 Eur/MWh to 140 Eur/MWh) and biofuel (from 7 Eur/MWh to 17 Eur/MWh) prices were changed, revealed that when one of the factors deteriorating the project's economic efficiency, in many cases it remains acceptable to implement.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Įvadas.....	10
1. Biomasės dujinimo procesas ir įrenginiai.....	11
1.1. Biomasės samprata ir naudojimo plėtra	11
1.2. Biomasės dujinimo proceso reakcijos	12
1.3. Dujifikavimo proceso ir įrangos klasifikacija	15
1.3.1. Stacionaraus sluoksnio dujifikatoriai.....	18
1.3.2. Verdančio sluoksnio dujifikatoriai	20
2. Termodinaminės pusiausvyros modelis skirtas biomasės dujinimo produktų sudėčiai nustatyti.....	22
2.1. Skaičiuoklės rezultatų tikslumas	25
2.2. Drėgmės kiekio biokure ir dujinimo temperatūros įtaka sintezės dujų sudėčiai ir šiluminei vertei	27
3. Biomasės dujinimo panaudojimas kombinuotai šilumos ir elektros gamybai su vidaus degimo varikliu	32
3.1. Įmonės energijos poreikių tenkinimas biomasės mikro–kogeneracine dujinimo jėgaine	34
3.2. Biomasės dujinimo jėgainės įranga	38
3.3. Biomasės dujinimo jėgainės veikimo principas	40
3.4. Biomasės dujinimo jėgainės naudojamas kuras	41
3.5. Jėgainės pagaminamos elektros energijos pasaugojimo tinkluose poreikis	41
3.6. Jėgainės projekto ekonominiai skaičiavimai	43
3.7. Jėgainės projekto jautrumo analizė	48
Išvados	53
Literatūros sąrašas	54
Priedai.....	58
1 priedas. Biomasės dujinimo produktų skaičiuoklė (Matlab) [24]	58
2 priedas. Biomasės dujinimo jėgainės techniniai parametrai (Įrangos gamintojas – Spanner Re ²). 62	
3 priedas. Biomasės dujinimo jėgainės komponentų išdėstymo brėžiniai ir technologinės schemos (Įrangos gamintojas – Spanner Re ²)	67
4 priedas. Biomasės dujinimo jėgainės eksploatacinėms sąnaudoms skaičiuoti naudojami koeficientai (Gamintojo, Spanner Re ² informacija)	72

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Dujinimo technologijų charakteristikų palyginimas [15].....	17
2 lentelė. Standartinės dujinių produktų susidarymo entalpijos (kJ/kmol) ir koeficientai.....	24
3 lentelė. Įvairių dujų savitosios šilumos koeficientai	25
4 lentelė. Sintezės dujų koncentracijos (sausas tūris), kai kinta skiedrų drėgmės kiekis.....	28
5 lentelė. Sintezės dujų koncentracijos (sausas tūris), kai kinta dujinimo temperatūra	28
6 lentelė. Įmonės energijos poreikiai per metus.....	37
7 lentelė. Biomasės dujinimo jėgainių galingumai ir pagaminami energijos kiekiai per metus.....	37
8 lentelė. Pagrindiniai biomasės dujinimo jėgainės parametrai	39
9 lentelė. Gaminančio vartotojo mokėtinų sumų palyginimas.....	43
10 lentelė. Biokuro sausosios masės komponentinė sudėtis	44
11 lentelė. Biokuro naudojamosios masės komponentinė sudėtis	44
12 lentelė. Jėgainės projekto finansinis balansas	46
13 lentelė. Jėgainės projekto PAL, TAL, VGN ir GDV parametrai	47
14 lentelė. Jautrumo analizės rezultatai keičiant paramos intensyvumą.....	48
15 lentelė. Jautrumo analizės rezultatai keičiant diskonto normą.....	49
16 lentelė. Jautrumo analizės rezultatai keičiant elektros kainą	50
17 lentelė. Jautrumo analizės rezultatai keičiant biokuro kainą.....	51

Paveikslų sąrašas

1 pav. Biomasės rūšys	11
2 pav. Pagrindiniai dujofikavimo proceso etapai ir juose vykstančios reakcijos.....	15
3 pav. Dujinimo technologijų šiluminės galios ribos [7]	17
4 pav. Aukštyn judančio srauto dujofikatorius	18
5 pav. Žemyn judančio srauto dujofikatorius.....	19
6 pav. Burbuliuojančio verdančio sluoksnio dujofikatorius	20
7 pav. Cirkuliuojančio verdančio sluoksnio dujofikatorius	21
8 pav. Sintezės dujų komponentų koncentracijų skaičiavimo rezultatai, kai dujinamos skiedros..	26
9 pav. Sintezės dujų komponentų koncentracijų skaičiavimo rezultatai, kai dujinamos granulės..	26
10 pav. Sintezės dujų sudėties priklausomybė nuo skiedrų drėgmės kiekio	28
11 pav. Sintezės dujų sudėties priklausomybė nuo dujinimo temperatūros	29
12 pav. Sintezės dujų apatinio šilumingumo priklausomybė nuo skiedrų drėgmės kiekio	30
13 pav. Sintezės dujų apatinio šilumingumo priklausomybė nuo dujinimo temperatūros	30
14 pav. Biomasės dujinimo proceso panaudojimo energijos gamybai schemas	32
15 pav. Biomasės dujinimo jėgainės su integruotu vidaus degimo varikliu principinė schema.....	33
16 pav. Įmonės pastato planas.....	35
17 pav. Biomasės dujinimo reaktoriaus principinė schema	39
18 pav. Biomasės dujinimo jėgainės principinė schema [39]	41
19 pav. GDV ir TAL priklausomybė nuo paramos intensyvumo	48
20 pav. GDV ir TAL priklausomybė nuo diskonto normos	49
21 pav. GDV ir TAL priklausomybė nuo elektros kainos	50
22 pav. GDV ir TAL priklausomybė nuo biokuro kainos	51

Ivadas

Augantys švarios ir tvarios energijos poreikiai bei nacionaliniai ir europiniai energetinio nepriklausomumo siekiai skatina ieškoti naujų ir pranašesnių energijos generavimo metodų. Tarp perspektyvių energijos gamybos būdų galima rasti – biomasės dujinimo technologiją. Biomasės dujinimas yra anglies pagrindu sudaryto kuro termocheminė konversija aukštoje temperatūroje, apimanti dalinę kuro elementų oksidaciją. Šio proceso rezultatas – sintetinės (sintezės) dujos, kurios gali būti plačiai panaudojamos šilumos gamybos, kogeneracijos arba moderniose energijos generavimo sistemose. Siekiant padidinti šios technologijos žinomumą ir skatinti plėtrą yra suformuluojamas darbo tikslas – išanalizuoti biomasės dujinimo procesą bei technologijų galimybes energijos gamybai.

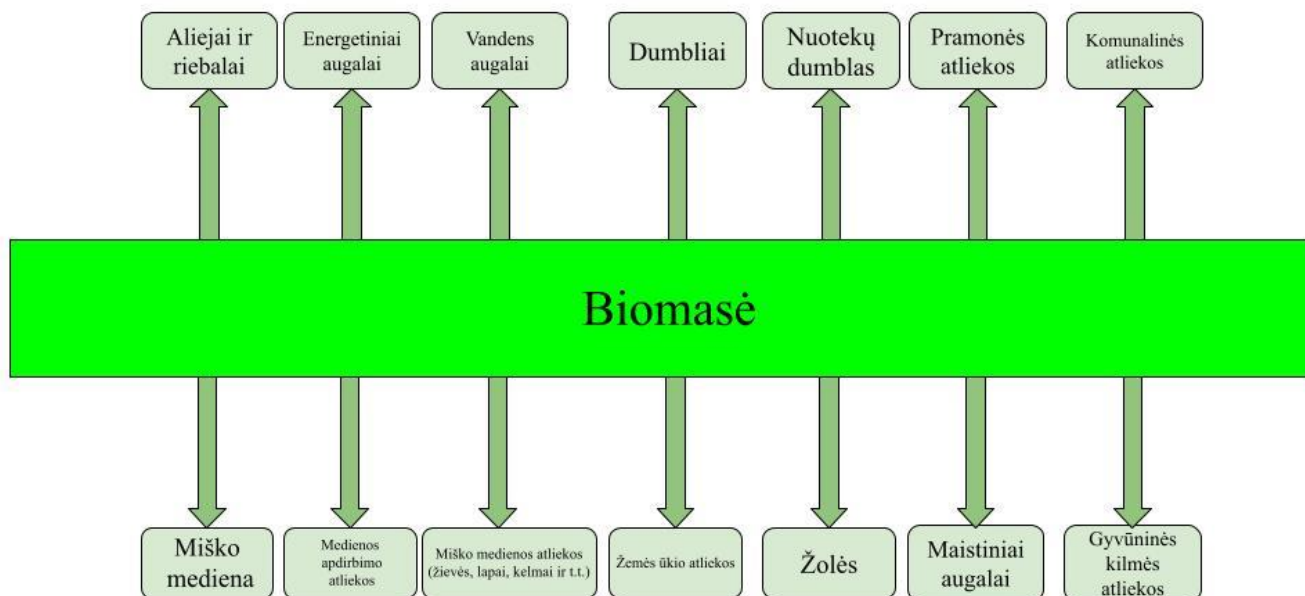
Tikslo įgyvendinimui yra būtina apibrėžti naudojamus išteklius – kurą (biomasę) ir jo vartojimo plėtros galimybes, pagrindines dujinimo proceso reakcijas ir etapus bei agregatus ir jų charakteristikas. Projektuojant dujinimo įrangą arba analizuojant kuro išnaudojimo energijos gamyboje galimybes, atsiranda poreikis nustatyti sintezės dujų struktūrą ir koncentracijas. Tačiau dujinimo produktų eksperimentinė analizė yra brangus procesas. Dėl šios priežasties sintezės dujų sudėties prognozavimui yra pasitelkiamas termodinaminės pusiausvyros matematinis modelis. Šis modelis pasinaudojant elementine kuro sudėtimi prognozuoja sintetinių dujų komponentų koncentracijas, pasirinktoje dujinimo temperatūroje.

Paskutinis darbo uždavinys – ekonominiu požiūriu išanalizuoti biomasės dujinimo mikro–kogeneracinės jėgainės, skirtos įmonės energijos poreikių tenkinimui, projektą. Investicijos ekonominės galimybės kintant: paramos intensyvumui, diskonto normai, elektros ir biokuro kainoms yra įvertinamos atliekant jautrumo analizę.

1. Biomasės dujinimo procesas ir įrenginiai

1.1. Biomasės samprata ir naudojimo plėtra

Biomasė – biologiškai skaidžios biologinės kilmės žemės ūkio, miškų ūkio ir susijusių pramonės šakų, įskaitant žuvininkystę ir akvakultūrą, žaliavos, atliekos ir liekanos, įskaitant augalines ir gyvūnines medžiagas, taip pat biologiškai skaidžios pramoninės ir komunalinės atliekos [1]. Biomasė yra priskiriama atsinaujinančiųjų energijos išteklių grupei. Toliau pateiktame 1 pav., matome pagrindinius biologinių resursų tipus [2].



1 pav. Biomasės rūšys

Visi paminėti biomasės išteklių, turi skirtingas technines ir ekonomines galimybes ir iššūkius panaudojimui energijos gamybos srityje. Lietuvoje plačiausiai naudojami biomasės tipai – miško mediena, medienos apdirbimo ir miško medienos atliekos, jų pagrindinis pritaikymas yra šilumos gamybos sektoriuje. Šių rūšių naudojimas nėra maksimalus, egzistuoja galimybių padidinti jų panaudojimą, ypač, elektros generavimo sektoriuje. Mąstant apie neišnaudotus resursus, verta atkreipti dėmesį į žemės ūkio (šiaudus, maistinius augalus ir kt.), miško kirtimo atliekas (kelmus), nusausintą dumblą ir kitus, kurių metinis potencialas siekia bent 10 TWh [3].

Pagrindinis biomasės resursus vienijantis aspektas – jų vartojimas energetikos sektoriuje prisideda prie klimato kaitos stabdymo ir darnumo vystymo. Mokslo bendruomenėje yra priimta laikyti, jog biomasės arba jos produktų deginimas, į atmosferą grąžina anglies dioksidą (CO₂), kuris buvo absorbuotas augalams augant, taip vyksta neutralus procesas. Verta prisiminti, jog kietojo biokuro – malkų ir kurui skirtų medienos bei žemės ūkio atliekų naudojimas, Lietuvai padėjo pasiekti Europos Sąjungos numatytą tikslą – iki 2020 metų iš atsinaujinančių energijos išteklių pagaminti nemažiau kaip 23 % visos pagaminamos energijos. Šį tikslą Lietuva pasiekė jau 2014 metais [4]. Tuo tarpu, tolesnis medienos biokuro ir ypač žemės ūkio atliekų naudojimas, gali padėti siekti, Lietuvos Respublikos energetikos įstatymo Nr. IX-884 14 straipsnyje, Nacionalinėje energetinės

nepriklausomybės strategijoje [5] numatyto, tikslo – atsinaujinančių energijos išteklių dalies galutiniame energijos suvartojimo balanse augimo iki 80 %, 2050 metais. Biomasės naudojimas taip pat prisideda ir prie bendrų Europos Sąjungos darnaus vystymosi tikslų.

1.2. Biomasės dujinimo proceso reakcijos

Biomasės dujinimas yra anglies pagrindu sudaryto kietojo kuro termocheminė konversija aukštoje temperatūroje, apimanti dalinę kuro elementų oksidaciją. Šio proceso rezultatas yra kuro dujos – vadinamosios sintezės, kurias sudaro: anglies monoksidas (CO), vandenilis (H₂), anglies dioksidas (CO₂), vandens garai (H₂O), metanas (CH₄), taip pat, maži aukštesnės kategorijos angliavandenilių kiekiai bei priemaišos, tokios kaip anglies dalelės, dervos, pelenai, azoto ir sieros junginiai, šarminiai metalai, chloridai ir kitos [6].

Biomasės dujinimą racionaliu naudoti turint prastos kokybės kurą, kurio tradicinis deginimas ant ardyno yra netikslingas. Tačiau pasitaiko atveju, kai dujinimo įranga yra reikli kuro atžvilgiu. Dažnu atveju, nekokybiško, mažo šilumingumo kietos fazės kuro dujinimas taikomas, nes siekiama kuo tiksliau panaudoti įprastai pramonei netinkančias atliekas, taip pat, norima gauti tinkamą dujinės fazės kurą, kuris tiktų kombinuotai šilumos ir elektros gamybos grandinei funkcionuoti.

Dujinimo procesas vyksta dujinimo įrenginiuose, kitaip vadinamuose reaktoriuose, dalyvaujant oksidatoriui, kuris gali būti oras, grynas deguonis, vandens garas arba jų deriniai [7]. Dujifikatoriaus viduje, neatsižvelgiant į jo rūšį, pasitaiko vienu metu vykstančios kelios reakcijos.

Dažniausiai priimta teigti, kad dujinimas vyksta keturiais etapais (kurių išsidėstymas reaktoriuje priklauso nuo įrangos tipo): džiovinimas, pirolizė, oksidacija ir anglies dujinimas [7], detalesnis kiekvienos pakopos aprašymas pateikiamas toliau.

Džiovinimo procesą sudaro drėgmės, esančios kure, išgarinimas. Šiame etape reikalingas šilumos kiekis yra proporcingas kuro drėgmės kiekiui. Paprastai reikalinga šiluma yra gaunama iš kitų proceso etapų. Džiovinimą galima laikyti baigtu, kai pasiekama ~150 °C biomasės temperatūra [8].

Pirolizė – cheminių medžiagų skaidymas be oro. Ši fazė paremta angliavandenilių rišamosios medžiagos (matricos) termocheminiu skilimu. Vykstant skilimo (didelės molekulinės masės junginiai skyla į mažesnės molekulinės masės junginius), izomerizacijos, polimerizacijos, polikondensacijos ir kitoms reakcijoms susidaro nauji junginiai [9]. Pirolizės metu suyra anglies ir vandenilio atomų cheminiai ryšiai, susidaro laisvieji radikalai, kurie dalyvauja tolesnėse cheminėse reakcijose [9]. Pirolizės būdu gali būti gaunamos skirtingos apdorojamos medžiagos frakcijos: kieta, skysta (kondensuota) ir dujinė [7].

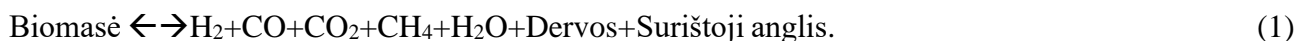
Kieta frakcija, verdančio sluoksnio dujifikatoriuose vykstančiame etape, gali svyruoti apie 5–10 % nuo bendros masės, o 20–25 % nuo bendros masės – stacionaraus sluoksnio dujifikatoriuose [10], be to, ji pasižymi dideliu anglies kiekiu ir aukšta šilumine verte. Ši frakcija apima ir neveiklias medžiagas, esančias biomasėje pelenų pavidalu.

Skystoji frakcija, paprastai vadinama derva arba degutu, kurio kiekis, skiriasi priklausomai nuo dujinimo įrenginio tipo, pavyzdžiui, mažesnis nei 1 % nuo bendros masės kiekis, gaunamas – žemyn judančio srauto reaktoriuose, o aukštyje judančio srauto reaktoriuose net iki 10–20 % nuo bendros masės. Šios sudėtingos organinės struktūros medžiagos kondensuojasi santykinai žemoje temperatūroje [10].

Dujinė frakcija, paprastai sudaro 70–90 % nuo tiekiamos medžiagos bendros masės [10]. Tai yra dujų mišinys, kuris nesuyra aplinkos temperatūroje. Dujinė frakcija yra vadinama pirolizės dujomis, jas daugiausia sudaro vandenilis, anglies monoksidas, anglies dioksidas ir lengvieji angliavandeniliai, tokie kaip metanas ir kiti C₂, C₃ angliavandeniliai, tuo tarpu, antraeilės sudedamosios dalys yra rūgštys arba inertinės dujos.

Pirolizės reakcijos vyksta esant 250–700 °C temperatūrai [11]. Jos yra endoterminės, o reakcijai šiluma yra gaunama dujinimo proceso oksidacijos metu.

Pirolizės procesą galima aprašyti pagal tokią reakciją [12]:



Kai kuras yra biomasė, jos pagrindinis komponentas yra celiuliozė (paprastai 50 % masės). Tad šioje stadijoje, biomasę galima apibrėžti naudojant cheminę celiuliozės išraišką [13]: C₆H₁₀O₅. Celiuliozės atveju, pirolizės reakcijos vyksta 600–700 °C temperatūroje.

Pirolizės procese egzistuoja keli sudėtingi reiškiniai. Tai apima šilumos perdavimą, produkto difuziją iš biomasės porų į dujinės fazės sankaupą ir kitas reakcijas.

Apibendrintai, galima teigti, kad pirolizė – tai kuro (nagrinėjamu atveju biomasės) terminis skilimas nesant deguonies, kai kaitinant iš kietosios kuro dalies yra išgaunami lakieji komponentai, o likutinę dalį sudaro surištoji anglis ir dervos. Produktų santykius veikia biomasės kuro cheminė sudėtis ir įrangos ypatybės bei jos eksploatavimo sąlygos.

Tuo tarpu dalies biomasės oksidacija yra būtina, norint gauti šiluminę energiją, kuri reikalinga palaikyti darbinę temperatūrą endoterminiams procesams vyksti. Oksidacija atliekama deguonies trūkumo sąlygomis, atsižvelgiant į stochiometrinį santykį, kad oksiduotųsi tik dalis kuro. Į oksidacijos zoną tiekiamą orą, be deguonies ir vandens garų, sudaro ir inertinės dujos, kurių įtaka yra nevertinama. Oksidacija dažnu atveju vyksta esant 700–1000 °C temperatūrai [8]. Tarp ore esančio deguonies ir kieto kuro (biomasės) vyksta heterogeninė reakcija [14]. Toliau parašytos pagrindinės oksidacijos proceso reakcijos. Pirmoji lygtis – anglies degimo [6, 7, 15]:



Kure esantis vandenilis reaguoja su oro sraute esančiu deguonimi:



Dalinė oksidacija:



Dujinimo etape, aukštoje temperatūroje vyksta daugybė cheminių reakcijų. Toliau minimos pagrindinės dujinimo reakcijos [6, 7, 8, 15].

Boudouard reakcija – anglies ir jos dujinių fazių CO ir CO₂ reakcijos pusiausvyra.



Anglies dujinimo reakcija:



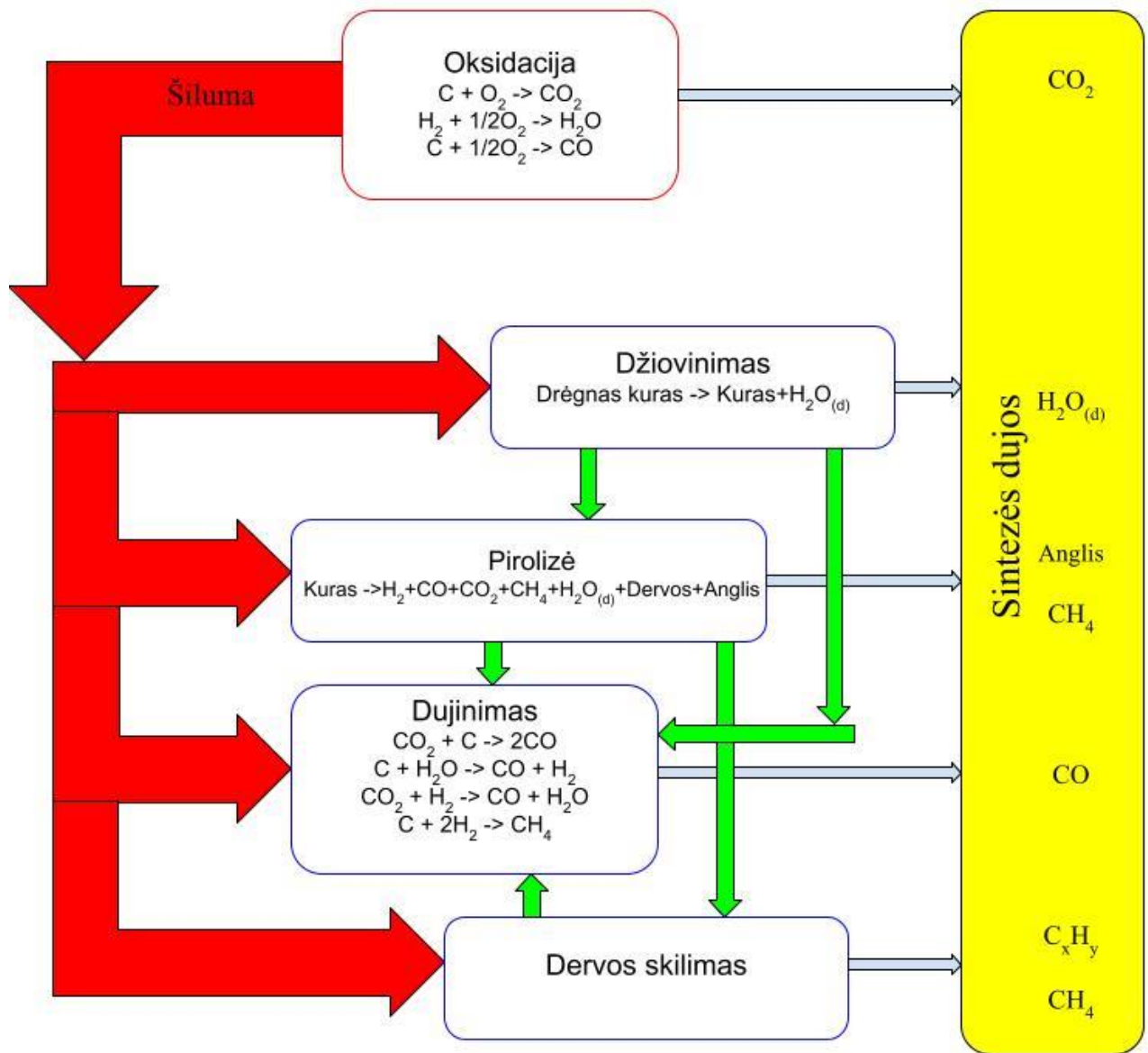
Vandens garų konversijos reakcija:



Metano susidarymo reakcija:



Minuso ir pluso ženklai prie reakcijų rodo šilumos energijos išsiskyrimą arba absorbciją (egzotermine ir endotermine reakcija). Reakcijos (5 ir 6) yra endotermine, o reakcijos (7 ir 8) yra egzotermine, tačiau tiek Boudouard reakcija, tiek anglies dujinimo reakcija daro šią pakopą visiškai endotermine, o tai lemia, kad jai reikalinga energija iš oksidacijos reakcijų zonos. Reakcijos (5–8) yra cheminės pusiausvyros reakcijos, todėl produktai ir reagentai gali kartu egzistuoti ir išlaikyti savo koncentracijos santykį, kaip apibrėžta termodinaminės pusiausvyros dėsniais. Temperatūra, kurioje atliekamas dujinimo etapas, vaidina pagrindinį vaidmenį formuojantis sintetinių dujų sudėčiai, taigi ir jos savybėms. Aukšta temperatūra padidina anglies oksidaciją ir sumažina pelenų susidarymą. Kita vertus, temperatūros augimas padidina pelenų lydymosi riziką ir sumažina sintetinių dujų energetinį potencialą. Nagrinėjant literatūrą [6, 7, 8, 15], randama, jog įprastas temperatūros diapazonas, kuriame dujifikavimo procesai būna įvykę, yra 800–1100 °C, o dujinimo procese, kuriame naudojamas deguonis, temperatūra svyruoja tarp 500–1600 °C.



2 pav. Pagrindiniai dujofikavimo proceso etapai ir juose vykstančios reakcijos

Dažniausiai laikoma (konkrečiu atveju priklauso nuo dujofikavimo įrangos tipo), jog biomasės dujinimo produktų sudėtis [6, 7, 15]:

1. ~85 % – generatorinės (sintezės) dujos (CO , H_2 , CH_4 , H_2O , CO_2);
2. ~0–5 % – dervos;
3. ~0–10 % – anglis.

1.3. Dujofikavimo proceso ir įrangos klasifikacija

Dujinimo (dujofikavimo) procesą galima klasifikuoti pagal įvairius kriterijus. Svarbiausi iš jų:

Dujinimo proceso aplinka [7, 15]:

1. atmosferinė;
2. slėginė.

Naudojamas oksidatorius [7]:

1. oras;
2. deguonis;

3. vandens garas;
4. dujų mišiniai.

Pagaminamų sintezės dujų šiluminę vertę [16]:

1. žema: 4–6 MJ/Nm³ (oksidatorius – oras arba oro ir vandens garo mišinys);
2. vidutinė: 12–18 MJ/Nm³ (oksidatorius – deguonis arba vandens garas);
3. aukšta: 40 MJ/Nm³ (oksidatorius – vandenilis).

Dujinimo įrenginio tipas [7]:

1. stacionaraus sluoksnio;
2. verdančio sluoksnio;
3. srovinio tipo;
4. plazminio tipo.

Sintezės dujų paskirtis:

1. šilumos gamyba;
2. kombinuota šilumos ir elektros gamyba.

Biomasės dujofikatorius galima suskirstyti į pagrindines grupes [7]:

Stacionaraus sluoksnio reaktoriai:

1. aukštyn judančio srauto;
2. žemyn judančio srauto;
3. skersai judančio srauto.

Verdančio sluoksnio reaktoriai:

1. burbuliuojančio sluoksnio;
2. cirkuliuojančio sluoksnio;
3. dviejų sluoksnių.

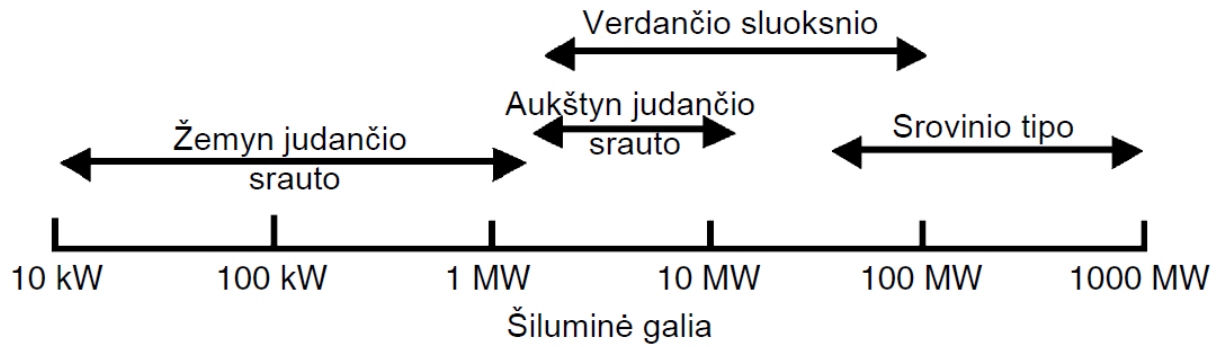
Srovinio tipo reaktoriai:

1. bendraašis žemyn judančio srauto;
2. priešingo srauto.

Plazminiai reaktoriai.

Toliau esančiame 3 pav. yra pateikta skirtingų dujinimo technologijų šiluminės galios diapazonai. Galima pastebėti, jog mažiausios galios, iki ~1 MW įrenginiai yra žemyn judančio srauto tipo. Kiek didesnės galios, iki ~10 MW yra gaminami aukštyn judančio srauto dujinimo įrenginiai. Tuo tarpu dideli, pramoniniai įrenginiai iki 1000 MW, dažniausiai būna – verdančio sluoksnio arba srovinio tipo.

1 lentelėje pateiktas dujinimo technologijų palyginimas, jame matomi esminių parametru sugretinimai leidžia suprasti įrangos tinkamumą konkrečiam nagrinėjamam atvejui.



3 pav. Dujinimo technologijų šiluminės galios ribos [7]

1 lentelė. Dujinimo technologijų charakteristikų palyginimas [15]

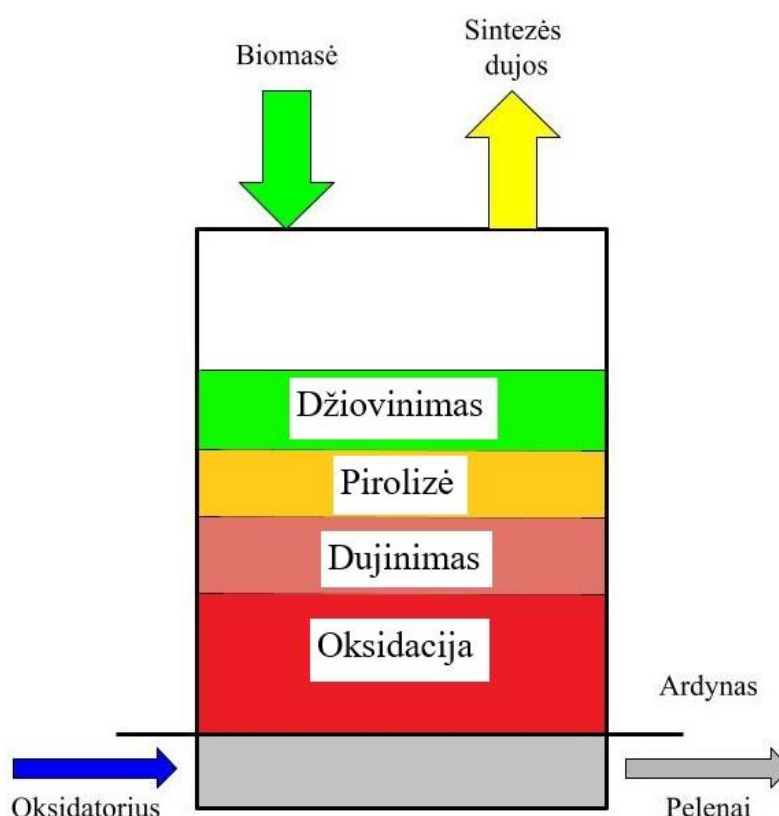
Charakteristika	Stacionaraus sluoksnio žemyn judančio srauto	Stacionaraus sluoksnio aukštyn judančio srauto	Stacionaraus sluoksnio skersai judančio srauto	Verdančio sluoksnio	Srovinio tipo
Drėgmė kure, %	iki 25	iki 60	10 – 20	-	-
Peleningumas, %	iki 6			iki 25	0,5–1
Kuro dalelių dydis, mm	20–100			5–100	5–20
Smulkios kuro frakcijos toleravimas	Ribotas			Geras	Puikus
Rupumo toleravimas	Labai geras			Geras	Blogas
Išeinančių dujų temperatūra, °C	700	200–400	1250	800–1000	>1260
Reikalavimas oksidatoriui	Žemas			Vidutinis	Aukštas
Reakcijos zonos temperatūra, °C	850–1200	800–1100	>1500	800–1000	1990
Vandens garų poreikis	Aukštas			Vidutinis	Žemas
Pelenų fazė	Sausa			Sausa	Šlakuota
Šaltų dujų efektyvumas, %	85–90	90–95	75–90	89	80
Pritaikymas	Mažos galios			Vidutinės galios	Didelės galios
Pagrindinės problemos	Dervos ir kietosios dalelės, didelė vandens garų koncentracija dujose, smulki kuro frakcija			Anglies konversija	Pagamintų dujų aušinimas
Pelenų lydymosi temperatūra, °C	>1250	>1000	-	-	-
Dervų kiekis, g/Nm ³	0,015–3	30–150	0,01–0,1	~10	-
Dujų šilumingumas, MJ/m ³	4,5–5	5–6	4–4,5	4–13	~9

Toliau aprašomi pagrindiniai naudojami dujinimo įrenginiai: stacionaraus sluoksnio aukštyn judančio srauto, stacionaraus sluoksnio žemyn judančio srauto, burbuliuojančio verdančio sluoksnio ir cirkuliuojančio verdančio sluoksnio. Detalesnis kiekvieno iš jų aprašymas yra pateikiamas atskirai.

1.3.1. Stacionaraus sluoksnio dujifikatoriai

Stacionaraus sluoksnio dujinimo įrenginiuose yra nejudantis ardynas, kurio funkcija – išlaikyti stacionarius procesų zonų sluoksnius. Šie reaktoriai pasižymi paprastumu bei dažniausiai gaminami kaip mažos, rečiau vidutinės galios įrenginiai [7]. Žinoma, šio tipo dujinimo įranga turi trūkumų, pavyzdžiui, eksploatacijos metu, gali kilti problemų kontroliuojant temperatūrinius dujinimo reakcijų zonos režimus bei optimalius reagentų santykius joje [17]. Dažniausiai naudojami stacionaraus sluoksnio dujifikatoriai: aukštyn ir žemyn judančio srauto [7].

Pirmasis nagrinėjamas dujinimo įrenginio tipas yra aukštyn judančio srauto, toliau pateikta jo schema (4 pav.).



4 pav. Aukštyn judančio srauto dujifikatorius

Šiame dujinimo įrenginyje biomasė yra tiekama per viršutinę dalį, kurioje ją veikia (džiovinama) ištekantių karštų sintezės dujų srautas. Toliau, kuras patenka į pirolizės zoną. Po pirolizės proceso likusi anglis, toliau judėdama žemyn patenka į dujinimo zoną, kur yra skaidoma į dujinius produktus. Tuo metu pirolizės garai, keliauja aukštyn su aukštos temperatūros sintezės dujomis. Šiuose garuose esanti derva prilimpa prie žemyn judančio kuro arba išteka iš dujifikatoriaus su sintezės dujų srautu [6]. Dalis dervų, kurios prisijungia prie kuro, vėliau patenka į dujinimo reakcijų zoną bei ten yra suskaidomos į dujinius produktus [17]. Kita dervų dalis įtakoja dujų užterštumą ir lemia jų aukštą šilumingumą. Oksidacijos zonoje, dalis nedujifikuotos anglies yra panaudojama šilumai gauti, taip užtikrinant dujinimo proceso vyksmą. Naudojami oksidatoriai – oras, deguonis, vandens garas.

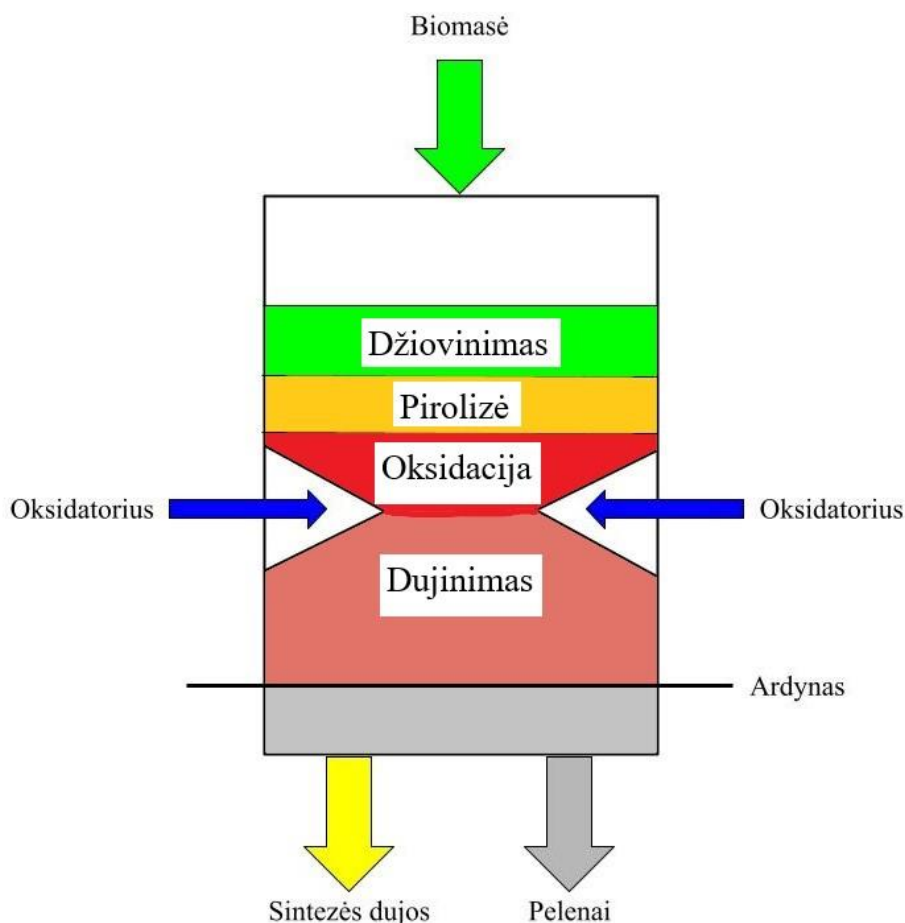
Tokio biomasės dujinimo įrenginio pranašumai:

1. nebrangus, nesudėtingas ir laiko patikrintas sintezės dujų gamybos procesas [17];

2. gali apdoroti itin drėgną biomasę (<60 %) [7].

Šio įrenginio trūkumas – aukštas sintetinių dujų užterštumas derva (<150 g/Nm³), tai įtakoja didelį jų filtravimo poreikį.

Antrasis nagrinėjamas dujinimo įrenginys – žemyn judančio srauto. Šiame dujofikatoriuje, pirminis oras (oksidatorius) yra tiekiamas tiesiai į oksidacijos zoną (5 pav.). Pagamintos sintezės dujos išeina pro apatinę įrenginio dalį, dėl to, žemyn keliaujančios dervos pereina karštą anglių sluoksnį, kuriame virsta į dujas: H₂, CO, CO₂ ir CH₄. Žinoma, iš įrenginio ištekančiose dujose dervos egzistuoja, tačiau itin mažas jų kiekis: 0,015–3 g/Nm³ [7].



5 pav. Žemyn judančio srauto dujofikatorius

Dėl mažesnio dervų ir kietųjų dalelių filtravimo poreikio, žemyn judančio srauto dujinimo įrenginiai yra efektyvesni ekologiniu požiūriu nei aukštyn judančio srauto įrenginiai. Esminis šios įrangos trūkumas – veikimui reikalingas perdirbtas kuras. Mažos ir lengvos kuro dalelės sukelia srauto problemas bei slėgio kritimą, todėl yra reikalingas biokuro granuliavimas arba briketavimas [17]. Dėl pelenų lydymosi pasekmės – šlako poveikio, šie įrenginiai turi didesnių problemų nei aukštyn judančio srauto įrenginiai, taip pat reikia paminėti mažiau efektyvius įrenginyje vykstančius šilumos mainus ir žemesnę pagaminamų sintezės dujų šiluminę vertę [7]. Šio tipo dujofikatoriai yra pritaikyti naudoti sausą (iki 25 % drėgmės), mažo peleningumo (<6 %) biokurą.

Tokio biomasės dujinimo įrenginio pranašumai [17]:

1. didžioji dalis susidariusios dervos suskyla, todėl reikalingas minimalus dujų filtravimas;

2. didelė dalis kietųjų dalelių, lieka kartu su nedujofikuota anglimi ir pelenais, tai taip pat mažina dujų valymo poreikį;
3. nebrangus, nesudėtingas ir laiko patikrintas sintezės dujų gamybos procesas.

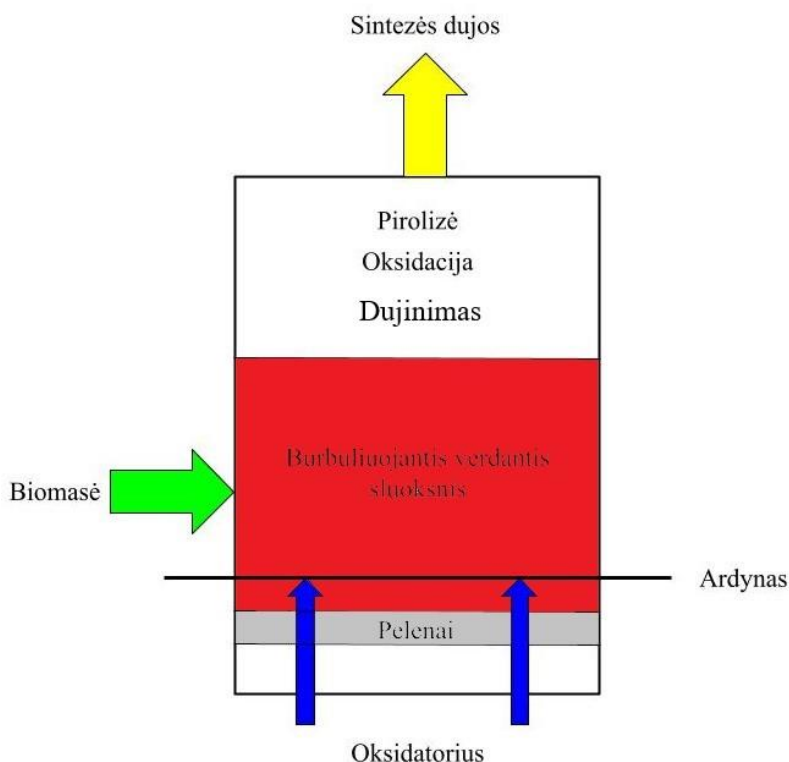
Tuo tarpu, trūkumai [17]:

1. reikalingas mažai drėgmės turintis kuras (biokuras) (<25 %);
2. pagamintos dujos palieka reaktorių aukštos temperatūros, tad prieš naudojimą, jas reikia atvėsinti;
3. 4–7 % anglies nėra paverčiami dujomis.

1.3.2. Verdančio sluoksnio dujofikatoriai

Verdančio sluoksnio įrenginiai pasižymi tolygiu temperatūros pasiskirstymu dujinimo zonoje, kuris pasiekiamas naudojant kietąsias inertines medžiagas (jū sluoksnį), į kuri patenka oras, taip sukurdamas tariamai verdantį sluoksnį [7]. Šis sluoksnis sukuria artimą inertinių medžiagų, karštų dujų ir tiekiamos biomasės kontaktą. Naudojami du pagrindiniai tokio tipo įrenginiai: cirkuliuojančio arba burbuliuojančio verdančio sluoksnio. Reikia pabrėžti, jog dažniausiai šie dujofikatoriai yra didelės šiluminės galios (iki 100 MW).

Burbuliuojančio sluoksnio dujofikatoriai susideda iš reaktoriaus, kurio apačioje yra stacionarus ardynas, pro kurį tiekiamas oksidatorius (6 pav.).



6 pav. Burbuliuojančio verdančio sluoksnio dujofikatoriaus

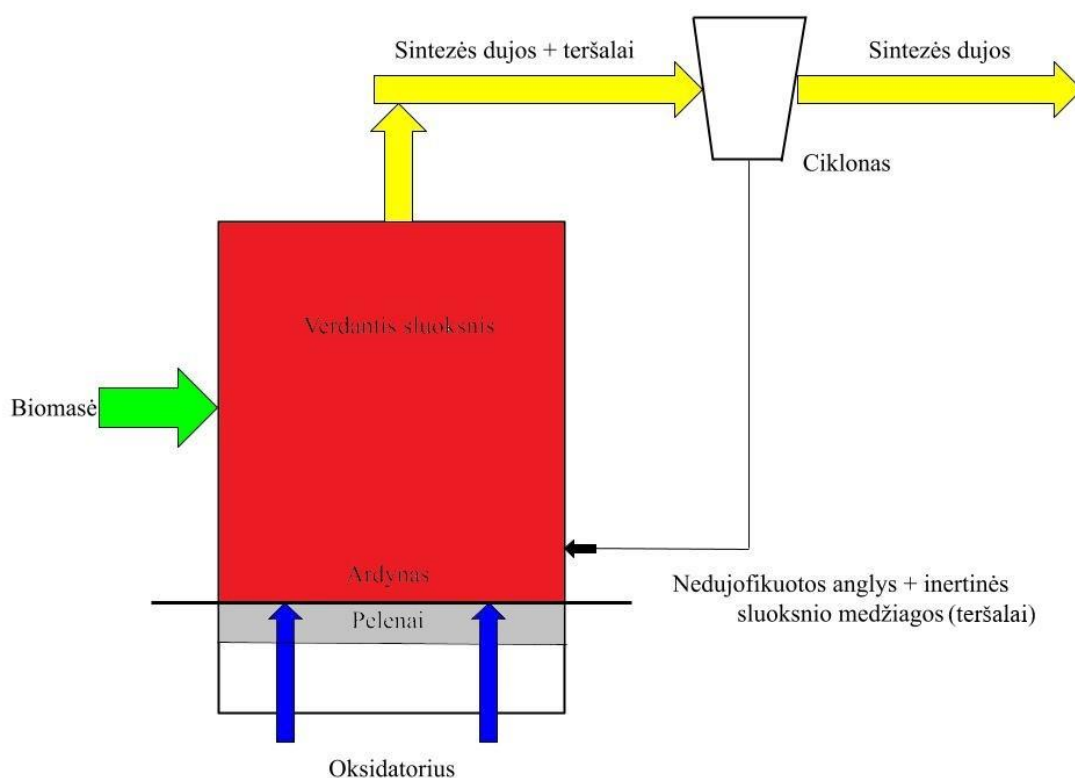
Virš stacionaraus ardyno yra judantis, verdantis inertinių medžiagų sluoksnis, į kurį tiekiamas biomasė. Oksidatoriaus (oro, deguonies, vandens garo arba dujų mišinių) ir biomasės santykio keitimo pagalba yra palaikoma verdančio sluoksnio temperatūra: 700–900 °C [17], vengiant inertinių medžiagų lydymosi. Šie dujofikatoriai gali būti aukštos arba žemos temperatūros tipo, o dujų gamyba

gali vykti atmosferinėmis arba slėginėmis sąlygomis. Vadinamasis virimo greitis (susietas su tiekiamo oro greičiu): 0,5–1 m/s [7].

Burbuliuojančio verdančio sluoksnio dujinimo įrenginių privalumai [17]:

1. tolygi sintezės dujų išėiga;
2. vienodas temperatūros pasiskirstymas visame reaktoriuje;
3. gali apdoroti įvairių dydžių kurą;
4. įmanomas spartus sintezės dujų gamybos greitis, užtikrinant mažą dervų ir nedujofikuotos anglies kiekį.

Cirkuliaciniuose verdančio sluoksnio įrenginiuose, sluoksnio medžiagos ir priemaišos (teršalai) cirkuliuoja tarp dujinimo indo ir ciklono separatoriaus. Ciklone, iš dujų srauto atskirti teršalai (nedujofikuotos anglis ir dervos) ir sluoksnio medžiagos yra grąžinamos į reaktorių, tuo tarpu sintezės dujos keliauja į kitus apdorojimo etapus. Dėl didelio paviršinio dujų greičio ir gero medžiagų maišymosi, šie dujofikatoriai gali apdoroti didelius kuro kiekius. Šio dujinimo įrenginiai yra itin tinkami kurui su dideliu lakiųjų medžiagų kiekiu [7]. Vadinamasis virimo greitis (susietas su tiekiamo oro greičiu) yra ženkliai didesnis nei burbuliuojančio verdančio sluoksnio atveju: 3,5–5,5 m/s. Palaikoma verdančio sluoksnio temperatūra: 800–1000 °C [7].



7 pav. Cirkuliuojančio verdančio sluoksnio dujofikatorius

Tokio dujofikatoriaus privalumas yra greitas funkcionavimas, kuris leidžia patenkinti staigų dujų poreikį užtikrinant mažą dervų ir nedujofikuotos anglies kiekį [17].

Reikia pastebėti, jog minėtų verdančio sluoksnio technologijų įrengimo kaštai yra dideli, o taikymas yra racionalus, kai reikalingas šiluminės galios poreikis yra >10 MW.

2. Termodinaminės pusiausvyros modelis skirtas biomasės dujinimo produktų sudėčiai nustatyti

Biomasės pasirinkimas dujųofikavimui dažniausiai priklauso nuo lokalių veiksnių, nagrinėjant Lietuvos atvejį, galima teigti, jog labiausiai tinkamos yra kurui skirtos medienos atliekos. Reikia atkreipti dėmesį, kad biokuro sudėtis, daugeliu atvejų skiriasi, dėl kuro kilmės, rūšies, jo apdorojimo bei kitų faktorių, o tai gali paveikti dujinimo proceso metu gaunamų sintetinių dujų sudėtį. Šių dujų komponentių koncentracijos yra nežinomos, kol nėra atliekami eksperimentiniai dujinimo bandymai. Kadangi šie tyrimai yra daug sąnaudų reikalaujantis procesas, matematinis modelis prognozuojantis sintetinių dujų komponentių koncentracijas, naudojant elementinę biomasės analizę, tampa vertingu instrumentu [18].

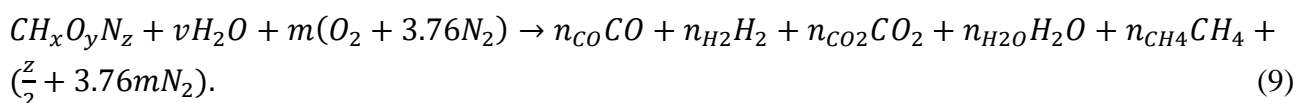
Egzistuoja keli matematiniai algoritmai, kurie gali būti pasitelkiami dujinimo produktų koncentracijų prognozavimui, tarp jų bene dažniausiai naudojamas – termodinaminės pusiausvyros (stechiometrinis) [19]. Nagrinėjama sistema yra termodinaminėje pusiausvyroje, kai yra šiluminės, mechaninės ir cheminės pusiausvyros sąlygos. Šiluminė pusiausvyra atsiranda, kai sistemos temperatūra bėgant laikui nesikeičia ir turi vienodą vertę visuose jos taškuose. Cheminė pusiausvyra yra apibrėžiama minimalia laisvąja Gibso energija. Gibso energija (G) yra izobarinis-izoterminis potencialas [14], kuris sumažėja iki 0, kai sistema pasiekia cheminę pusiausvyrą. O sistemai neatliekant ir negaunant jokio darbo, atsiranda mechaninė pusiausvyra.

Taigi, šioje dalyje apibrėžiame skaičiavimą lengvinančias sąlygas ir matematinį algoritmą, kuris padėtų nustatyti biomasės dujinimo produktų koncentracijas. Taip pat yra atliekama biokuro drėgmės kiekio ir dujinimo temperatūros poveikio analizė gaunamiems rezultatams. Reikia pastebėti, jog šis modelis yra skirtas žemyn judančio srauto dujinimo įrenginiui.

Svarbu pastebėti, jog norint suformuoti paprastesnį termodinaminės pusiausvyros modelį yra būtina skaičiavimą aprašyti lengvinančiomis sąlygomis, šiuo atveju [19, 20, 21, 22, 23]:

1. visa biomasėje esanti anglis yra dujųofikuojama;
2. CO, CO₂, H₂, CH₄, N₂ ir H₂O yra pagrindinės sintezės dujų komponentės;
3. pelenų šlakavimasis dujinimo proceso metu nevyksta;
4. pagamintų dujų savybės prilyginamos idealiųjų dujų savybėms;
5. šiluma reikalinga dujinimui vykti yra gaunama iš oksidacijos proceso;
6. nėra vertinami sistemos šilumos nuostoliai;
7. į sistemą tiekiamo oro kiekis yra keičiamas, kad būtų pasiekta nustatyta dujinimo temperatūra;
8. dervos egzistavimas dujose yra nevertinamas;
9. iš dujinimo sistemos išleidžiamose dujose nėra deguonies;
10. slėgis dujinimo sistemoje – atmosferinis ir nekintantis.

Bendroji dujinimo reakcija [21]:



čia CH_xO_yN_z – biomasės cheminė formulė; x, y, z – vandenilio, deguonies ir azoto atomų skaičius vienam anglies atomui biomasėje; v – drėgmės kiekis (H₂O) 1 kmol biomasės, kmol; m – oro kiekis 1 kmol biomasės, kmol; n_{CO}, n_{H₂}, n_{CO₂}, n_{H₂O}, n_{CH₄} – dujinių produktų (CO, H₂, CO₂, H₂O, CH₄) molių skaičiai arba kitaip – stochiometriniai koeficientai.

v nustatomas pagal formulę [20]:

$$v = \frac{M_{biomas\acute{e}}w}{18(1-w)}. \quad (10)$$

čia $M_{biomas\acute{e}}$ – molekulinė biomasės masė, kg/kmol; w – santykinis biomasės drėgnumas, %.

Dujinimo sistemoje vykstančios reakcijos – Boudouard ir anglies dujinimo [20]:



Jas galima parašyti tokia forma (vandens garų konversijos reakcija) [20]:



Trečioji reakcija – metano susidarymo:



Šiame modelyje (13) ir (14) reakcijos yra pagrindinės. Jų pusiausvyros konstantos [20]:

$$K_1 = \frac{n_{CO_2} \cdot n_{H_2}}{n_{CO} \cdot n_{H_2O}}. \quad (15)$$

$$K_2 = \frac{n_{CH_4} \cdot n_{visi}}{n_{H_2}^2}. \quad (16)$$

Apskaičiuojant K_1 ir K_2 vertes yra naudojama Gibso laisvoji energija [20]:

$$\ln K = -\frac{\Delta G_T}{RT}. \quad (17)$$

čia ΔG_T – Gibso laisvoji energija, kJ/kmol; R – universalioji dujų konstanta, kJ/kmol·K; T – absoliutinė temperatūra, K.

$$\Delta G_T = \sum_i x_i \Delta \bar{g}_{s,T,i}^\circ. \quad (18)$$

čia x_i – dujinių produktų molių skaičiai; $\Delta \bar{g}_{s,T,i}^\circ$ – dujinių produktų Gibso laisvosios energijos pokytis dėl temperatūros, kJ/kmol.

Laisvosios Gibso energijos pokytis nustatomas pagal formulę [21]:

$$\Delta \bar{g}_{s,T,i}^\circ = H_{si}^0 - aT \ln T - bT^2 - \frac{c}{2}T^3 - \frac{d}{3}T^4 + \frac{e}{2T} + f + gT. \quad (19)$$

čia H_{si}^0 – standartinės dujinių produktų susidarymo entalpijos, kJ/kmol.

čia a – g – Gibso laisvosios energijos formulės koeficientai.

a – g koeficientai [21] yra pateikti toliau, kartu su standartinėmis dujinių produktų susidarymo entalpijomis (kJ/kmol), esant 25 °C temperatūrai ir 1 bar slėgiui.

2 lentelė. Standartinės dujinių produktų susidarymo entalpijos (kJ/kmol) ir koeficientai

Dujų rūšis	$\overline{H}_{si,298}^o$	a	b	c	d	e	f	g
CH ₄	-74,8	-4,62E-02	1,13E-05	1,32E-08	-6,65E-12	-4,89E+02	14,1	-0,223
CO	-110,5	5,62E-03	-1,19E-05	6,38E-09	-1,85E-12	-4,89E+02	8,68	-0,0613
CO ₂	-393,5	-1,95E-02	3,12E-06	-2,45E-08	6,95E-12	-4,89E+02	5,27	-0,121
H ₂ O	-241,8	-8,95E-03	-3,67E-06	5,21E-09	-1,48E-12	0	2,87	-0,172

Turint bendrąją dujinimo reakciją (9), galima parašyti C (20), H₂ (21) ir O₂ (22) molines balanso lygtis:

$$n_{CO} + n_{CO_2} + n_{CH_4} = 1. \quad (20)$$

$$x + 2v = 2n_{H_2} + 2n_{H_2O} + 4n_{CH_4}. \quad (21)$$

$$y + v + 2m = n_{CO} + 2n_{CO_2} + n_{H_2O}. \quad (22)$$

Kita svarbi lygtis yra gaunama sudarant dujinimo sistemos entalpijos balansą (23) [20]. Bendras cheminės medžiagos entalpijos dydis, susideda iš jos susidarymo ir savitosios entalpijos [14].

$$\begin{aligned} H_{s_{biomasė}}^o + v \left(H_{s_{H_2O_s}}^o + H_{s_{H_2O_d}}^o \right) + m \left(H_{s_{O_2}}^o + 3.76 H_{s_{N_2}}^o \right) = n_{CO} \left(H_{s_{CO}}^o + \int_{298}^{T_d} C_{p_{CO}} dT \right) + \\ n_{H_2} \left(H_{s_{H_2}}^o + \int_{298}^{T_d} C_{p_{H_2}} dT \right) + n_{CO_2} \left(H_{s_{CO_2}}^o + \int_{298}^{T_d} C_{p_{CO_2}} dT \right) + n_{H_2O} \left(H_{s_{H_2O}}^o + \int_{298}^{T_d} C_{p_{H_2O}} dT \right) + \\ n_{CH_4} \left(H_{s_{CH_4}}^o + \int_{298}^{T_d} C_{p_{CH_4}} dT \right) + \left(\frac{z}{2} + 3.76 m \right) \int_{298}^{T_d} C_{p_{N_2}} dT. \end{aligned} \quad (23)$$

čia $H_{s_{biomasė}}^o$ – biomasės susidarymo entalpija (nustatoma pagal apatinę biomasės šiluminę vertę ir pilno degimo produktų (CO₂ ir H₂O) susidarymo entalpijas), kJ/kmol; H_{si}^o – komponento susidarymo entalpija, kJ/kmol; T_d – dujinimo temperatūra, K.

Lygtį (23) galima supaprastinti, nes dydžiai $H_{s_{N_2}}^o$, $H_{s_{H_2}}^o$ ir $H_{s_{O_2}}^o$ yra lygūs 0, esant 25 °C temperatūrai ir 1 bar slėgiui.

$$\begin{aligned} H_{s_{biomasė}}^o + v \left(H_{s_{H_2O_s}}^o + H_{s_{H_2O_d}}^o \right) = n_{CO} \left(H_{s_{CO}}^o + \int_{298}^{T_d} C_{p_{CO}} dT \right) + n_{H_2} \left(\int_{298}^{T_d} C_{p_{H_2}} dT \right) + \\ n_{CO_2} \left(H_{s_{CO_2}}^o + \int_{298}^{T_d} C_{p_{CO_2}} dT \right) + n_{H_2O} \left(H_{s_{H_2O}}^o + \int_{298}^{T_d} C_{p_{H_2O}} dT \right) + n_{CH_4} \left(H_{s_{CH_4}}^o + \int_{298}^{T_d} C_{p_{CH_4}} dT \right) + \\ \left(\frac{z}{2} + 3.76 m \right) \int_{298}^{T_d} C_{p_{N_2}} dT. \end{aligned} \quad (24)$$

Izobarinę sąvitąją šilumą galima apskaičiuoti naudojant formulę [21]:

$$C_p(T) = a + bT + cT^2 + dT^3. \quad (25)$$

C_{pi} – savitoji šiluma atskirai komponentei, kJ/kmol·K; a, b, c, d – savitosios šilumos koeficientai.

a, b, c, d vertės priimamos pagal literatūros šaltinį [21].

3 lentelė. Įvairių dujų savitosios šilumos koeficientai

Dujų rūšis	a	b	c	d
N ₂	28,9	-0,1571E-02	0,8081E-05	-2,873E-09
CO ₂	22,26	5,981E-02	-3,501E-05	-7,469E-09
H ₂	29,11	-0,1916E-02	4,00E-06	-8,70E-10
CO	28,16	0,1675E-02	0,5372E-05	-2,22E-09
CH ₄	19,89	5,2E-02	1,269E-05	-11,01E-09
H ₂ O(d)	32,24	1,92E-03	1,055E-05	-3,595E-09

Apibrėžtame modelyje, pasinaudojant pasirinktų biomasės rūšių elementinėmis sudėtimis (sausos masės) yra gaunamos sintezės dujų komponentų koncentracijos. Esminis modelio principas – lygčių (15), (16), (20), (21), (22), (24) sprendimas Niutono – Jakobio iteraciniu metodu, minimizuojant Gibso laisvąją energiją pusiausvyros konstantų nustatymui. Šio skaičiavimo Matlab programos kodas yra pateikiamas 1 priede [24].

2.1. Skaičiuoklės rezultatų tikslumas

Norint patikrinti skaičiuoklės tikslumą, pasinaudojame literatūros šaltinyje [25] rastais eksperimentiniais dujinimo tyrimų rezultatais. Nagrinėjame du dujofikavimo atvejus.

Pirmuoju atveju, eksperimento metu yra dujofikuojamos mišrios medienos skiedros, kurių elementinė sausos masės sudėtis: C–48,77 %, H–5,85 %, N–0,05 %, S–0,01 %, O–44,52 %, A–0,8 %. Skiedrų drėgmės kiekis: W–10,6 %. Temperatūra dujinimo zonoje ~950 °C. Eksperimento metu gautos sintezės dujų komponentų koncentracijos: H₂–16,4 %, CO–22,6 %, CH₄–4,8 %, CO₂–11,05 %, N₂–44,9 %, C₂H₂–0,11 %, C₂H₆–0,08 %, C₃H₈–0,06 %. Apatinė dujų šiluminė vertė – 6,5 MJ/Nm³.

Antruoju atveju, eksperimento metu yra dujofikuojamos spygliuočių medienos granulės, kurių elementinė sausos masės sudėtis: C–49,20 %, H–6,20 %, N–0,08 %, S–0,06 %, O–44,06 %, A–0,4 %. Granulių drėgmės kiekis: W–5,2 %. Temperatūra dujinimo zonoje ~800 °C. Eksperimentų metu gautos sintezės dujų komponentų koncentracijos: H₂–14,01 %, CO–24,27 %, CH₄–4,12 %, CO₂–10,26 %, N₂–47,07 %, C₂H₂–0,13 %, C₂H₆–0,11 %, C₃H₈–0,03 %. Apatinė dujų šiluminė vertė – 6,21 MJ/Nm³.

Naudojamas dujinimo įrenginys – žemyn judančio srauto.

Eksperimento metu naudotų skiedrų ir granulių elementines sausos masės sudėtis, drėgmės kiekius ir dujinimo temperatūras suvedu į Matlab skaičiuoklę, gauti rezultatai, pateikti toliau 8 pav. ir 9 pav. (dujų koncentracijos pateiktos sauso tūrio atžvilgiu (be vandens garo)):

```

>> Dujifikacija
Elementinė kompozicija turi būti pateikta forma [C, H, O, N, Pelenai]
Įvesti elementinę biomasės kompoziciją: [48.77, 5.85, 44.52, 0.06, 0.8]
Pirminio spėjimo forma [H2 CO CO2 H2O CH4 3.76N2]

Dregmes_kiekis =

    10.6

Ar norite rasti sintetinių dujų sudėtį sausos bazės atžvilgiu (t/n): t

Atsakymas =

    't'

ans =

    0.1383 H2
    0.1851 CO
    0.1202 CO2
    0.0002 CH4
    0.5561 N2

```

8 pav. Sintezės dujų komponentų koncentracijų skaičiavimo rezultatai, kai dujinamos skiedros

```

>> Dujifikacija
Elementinė kompozicija turi būti pateikta forma [C, H, O, N, Pelenai]
Įvesti elementinę biomasės kompoziciją: [49.2, 6.2, 44.06, 0.14, 0.4]
Pirminio spėjimo forma [H2 CO CO2 H2O CH4 3.76N2]

Dregmes_kiekis =

    5.2

Ar norite rasti sintetinių dujų sudėtį sausos bazės atžvilgiu (t/n): t

Atsakymas =

    't'

ans =

    0.1744 H2
    0.2059 CO
    0.1087 CO2
    0.0013 CH4
    0.5097 N2

```

9 pav. Sintezės dujų komponentų koncentracijų skaičiavimo rezultatai, kai dujinamos granulės

Apskaičiuotas oro pertekliaus koeficientas skiedrų dujinimo atveju – 0,484, granuliu – 0,429. Skaičiavimo algoritme koeficientas – sureguliuojamas automatiškai pagal užduotą dujifikavimo temperatūrą. Tuo tarpu, deguonies kiekio kuro sudėtyje didėjimas lemia oro pertekliaus koeficiento mažėjimą.

Toliau, turint procentines sintezės dujų komponentų dalis, nustatau jų apatinę šiluminę vertę (AŠV) [25], skiedrų atveju:

$$A\check{S}V_{\text{sinvezės dujų.skiedr.}} = 10,792 \cdot H_2 + 12,636 \cdot CO + 35,818 \cdot CH_4 = 10,792 \cdot 0,1383 + 12,636 \cdot 0,1851 + 35,818 \cdot 0,0002 = 3,84 \frac{MJ}{Nm^3}. \quad (26)$$

čia H_2 , CO , CH_4 – vandenilio, anglies monoksido ir metano tūrinė dalis sinvezės dujose.

Apatinė sinvezės dujų šiluminę vertę ($A\check{S}V$), granuliu atveju:

$$A\check{S}V_{\text{sinvezės dujų.gran.}} = 10,792 \cdot H_2 + 12,636 \cdot CO + 35,818 \cdot CH_4 = 10,792 \cdot 0,1744 + 12,636 \cdot 0,2059 + 35,818 \cdot 0,0013 = 4,53 \frac{MJ}{Nm^3}. \quad (27)$$

Atlikus skaičiavimą ir turint sinvezės dujų komponentų koncentracijas bei $A\check{S}V$ vertes, galima padaryti keletą išvadų:

1. bendras vandenilio ir anglies monoksido tūris (kuris veikia sinvezės dujų šiluminę vertę) skiedrų dujinimo atveju: apskaičiuota vertė – 32,34 %, kai eksperimentinė vertė – 39 %. Granulių dujinimo atveju apskaičiuota bendra CO ir H_2 koncentracija – 38,03 %, eksperimentinė vertė – 38,28 %;
2. metanas yra pagrindinis sinvezės dujų angliavandenilinis junginys, tačiau skaičiavimų metu gautos koncentracijos sinvezės dujose yra tik 0,02 (skiedrų atveju) ir 0,13 % (granulių atveju). Reikia pabrėžti, kad CH_4 koncentracija eksperimentų metu gautose dujose dažniausiai būna <5 % [7] sauso tūrio arba kaip nagrinėjamame eksperimente – 4,8 % (skiedrų atveju) ir 4,12 % (granulių atveju). Tam įtakos turi į skaičiavimą neįtraukti pirolizės bei dervų skilimo dujiniai produktai;
3. apskaičiuotas oro pertekliaus koeficientas skiedrų dujinimo atveju – 0,484, granuliu – 0,429, kai eksperimentų metu nustatytos vertės atitinkamai – 0,21 ir 0,2;
4. apskaičiuotos $A\check{S}V$ vertės yra mažesnės už eksperimento metu gautų dujų, tai labiausiai įtakoja nustatyta maža CH_4 koncentracija.

Taigi, apibendrinant, galima daryti išvadą, kad ši skaičiuoklė nepateikia itin tikslų dujų koncentracijų, jos naudojimą riboja metano koncentracijos nustatymas. Tačiau įvertinus dujifikavimo proceso kompleksiskumą ir skaičiavimą lengvinančias sąlygas, galima teigti, kad skaičiuoklė tinka apytiksliam biomasės dujinimo produktų potencialo įvertinimui.

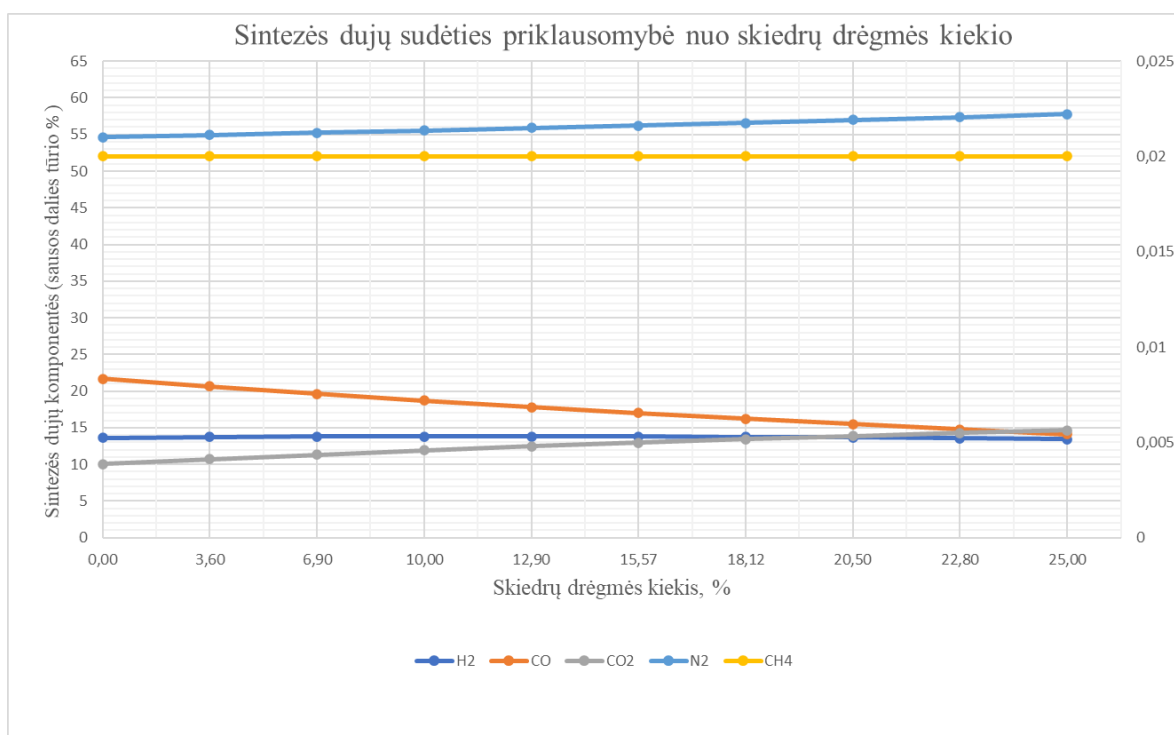
2.2. Drėgmės kiekio biokure ir dujinimo temperatūros įtaka sinvezės dujų sudėčiai ir šiluminei vertei

Drėgmės kiekio biokure ir dujinimo temperatūros įtakos sinvezės dujų sudėčiai ir šiluminei vertei nustatymui yra pasinaudojama mišrių medienos skiedrų elementine sausos masės sudėtimi: C – 48,77 %, H – 5,85 %, N – 0,05 %, S – 0,01 %, O – 44,52 %, A – 0,8 % [25]. Toliau atliekamos 4 analizės: keičiant skiedros drėgmės kiekį, o vėliau dujinimo temperatūrą yra stebimas dujų komponentų kitimas. Taip pat yra nustatoma skiedrų drėgmės kiekio ir dujinimo temperatūros įtaka sintetinių dujų šilumingumui.

Pirmoje dalyje tiriamame atveji, kai drėgmės kiekis skiedrose kinta nuo 0 % iki 25 %, tuomet atskirų dujų komponentų koncentracijos keičiasi kaip parodyta toliau esančiame 10 pav. Temperatūra dujinimo zonoje ~950 °C.

4 lentelė. Sintezės dujų koncentracijos (sausas tūris), kai kinta skiedrų drėgmės kiekis

Skaičiavimo Nr.	Skiedrų drėgmės kiekis	Sintezės dujų komponentės (sausas tūris (be vandens garų))				
	W, %	H ₂ , %	CO, %	CO ₂ , %	CH ₄ , %	N ₂ , %
1.	0	13,61	21,68	10,05	0,02	54,64
2.	3,6	13,72	20,62	10,72	0,02	54,92
3.	6,9	13,79	19,63	11,33	0,02	55,22
4.	10	13,83	18,7	11,91	0,02	55,54
5.	12,9	13,83	17,83	12,44	0,02	55,88
6.	15,57	13,81	17	12,94	0,02	56,23
7.	18,12	13,75	16,22	13,41	0,02	56,6
8.	20,5	13,68	15,48	13,85	0,02	56,98
9.	22,8	13,58	14,77	14,26	0,02	57,37
10.	25	13,46	14,11	14,64	0,02	57,77



10 pav. Sintezės dujų sudėties priklausomybė nuo skiedrų drėgmės kiekio

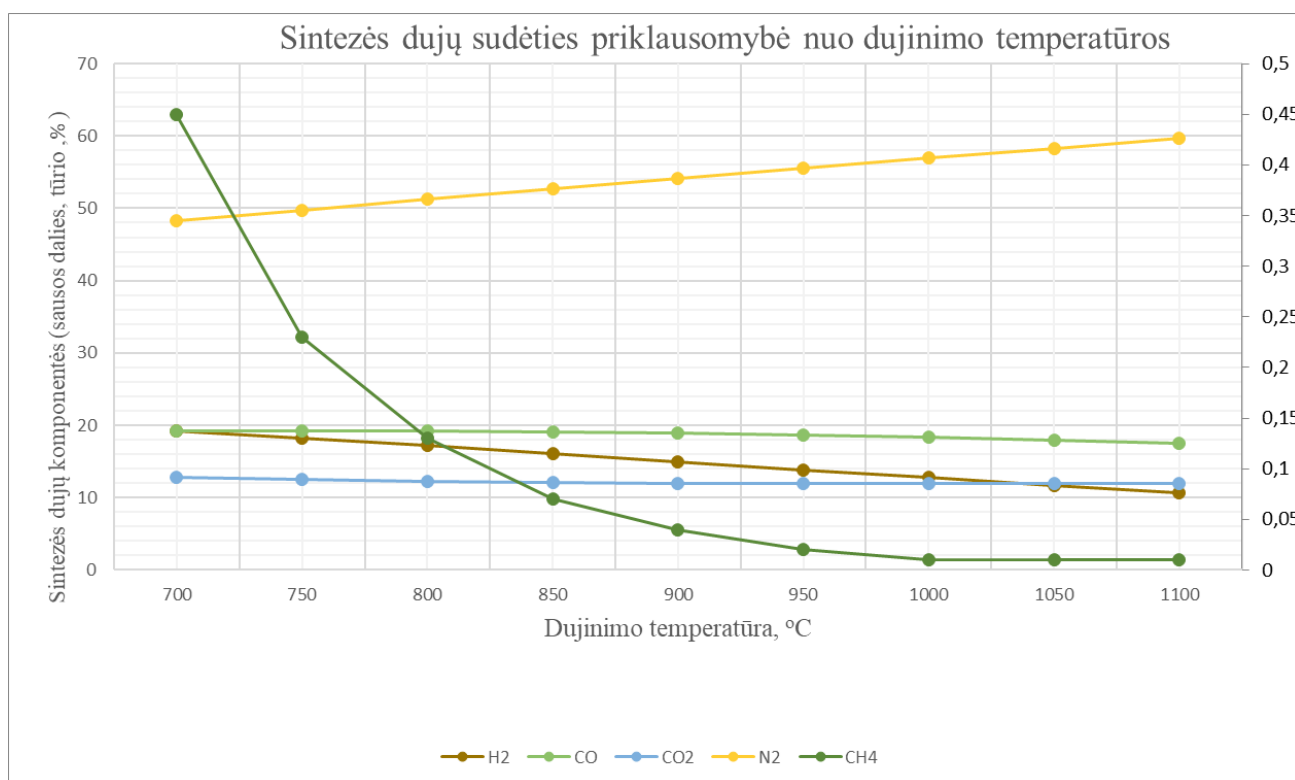
Antroje dalyje tiriamo atveji, kai dujinimo temperatūra kinta nuo 700 °C iki 1100 °C, tuomet atskirų dujų komponentių koncentracijos keičiasi kaip parodyta toliau esančiame 11 pav. Priimamas drėgmės kiekis skiedrose – 10 %.

5 lentelė. Sintezės dujų koncentracijos (sausas tūris), kai kinta dujinimo temperatūra

Skaičiavimo Nr.	Dujinimo temperatūra	Sintezės dujų komponentės (sausas tūris (be vandens garų))				
	t, °C	H ₂ , %	CO, %	CO ₂ , %	CH ₄ , %	N ₂ , %
1.	700	19,29	19,18	12,85	0,45	48,22

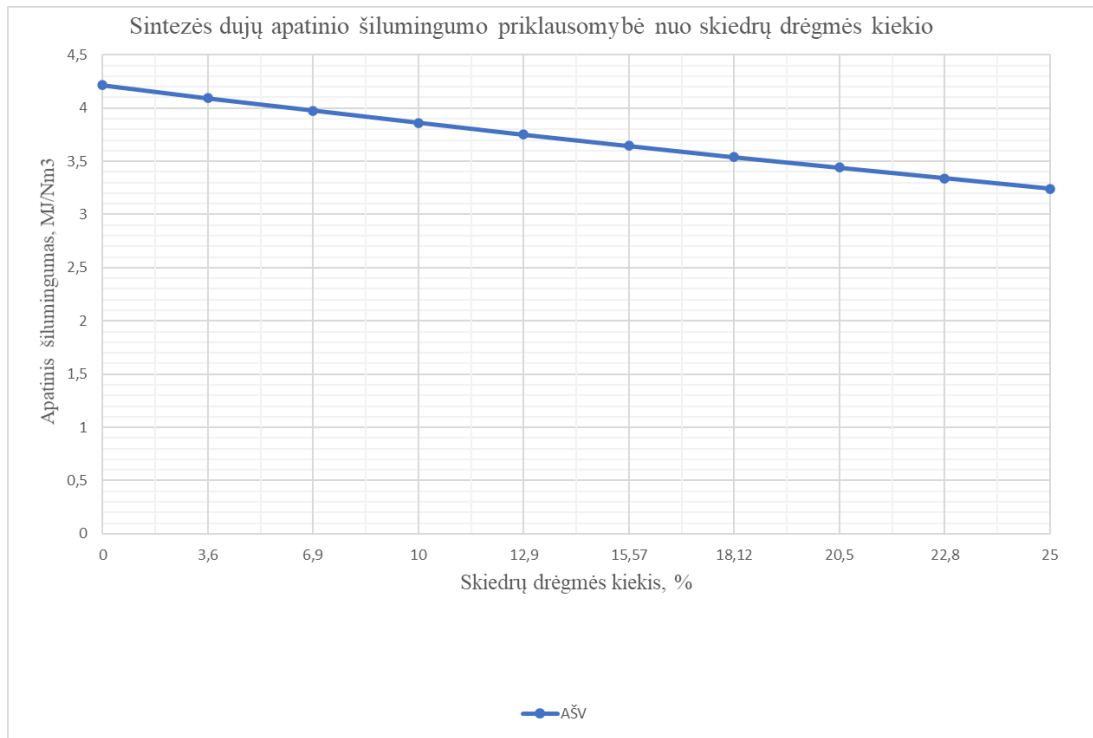
5 lentelė. (tęsinys)

2.	750	18,27	19,26	12,5	0,23	49,74
3.	800	17,16	19,24	12,25	0,13	51,22
4.	850	16,04	19,14	12,07	0,07	52,68
5.	900	14,92	18,95	11,96	0,04	54,12
6.	950	13,83	18,7	11,91	0,02	55,54
7.	1000	12,76	18,38	11,9	0,01	56,94
8.	1050	11,74	18	11,94	0,01	58,31
9.	1100	10,74	17,56	12,03	0,01	59,66

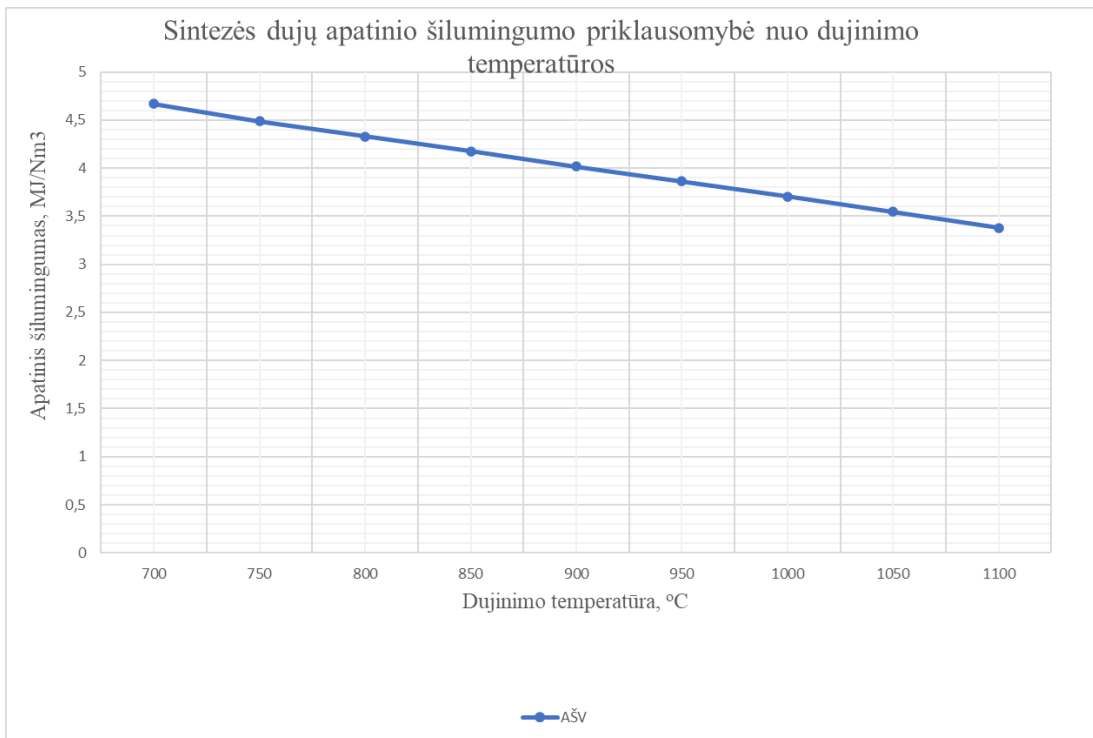


11 pav. Sintezės dujų sudėties priklausomybė nuo dujinimo temperatūros

12 ir 13 pav. yra pavaizduota skiedrų drėgmės kiekio ir dujinimo temperatūros įtaka apatinei sintezės dujų šiluminei vertei.



12 pav. Sintezės dujų apatinio šilumingumo priklausomybė nuo skiedrų drėgmės kiekio



13 pav. Sintezės dujų apatinio šilumingumo priklausomybė nuo dujinimo temperatūros

10 pav. matome, jog skiedrų drėgmės kiekiui kintant nuo 0 % iki ~13 %, vandenilio koncentracija pakyla nuo 13,61 % iki 13,83 %, toliau didėjant drėgmės kiekiui, ji mažėja. Skiedrų drėgmės kiekiui didėjant nuo 0 % iki 25 %, CO koncentracija mažėja, atitinkamai nuo 21,68 % iki 14,11 %, CO₂ koncentracija didėja nuo 10,05 % iki 14,64 %, o N₂ koncentracija didėja neženkiai, nuo 54,64 % iki 57,77 %. Metano koncentracija visame tiriamame skiedrų drėgmės kiekio intervale yra itin maža – 0,02 %. Taip pat reikia įvertinti, įtaką CO ir H₂ koncentracijoms darančią vandens garo tūrinę dalį,

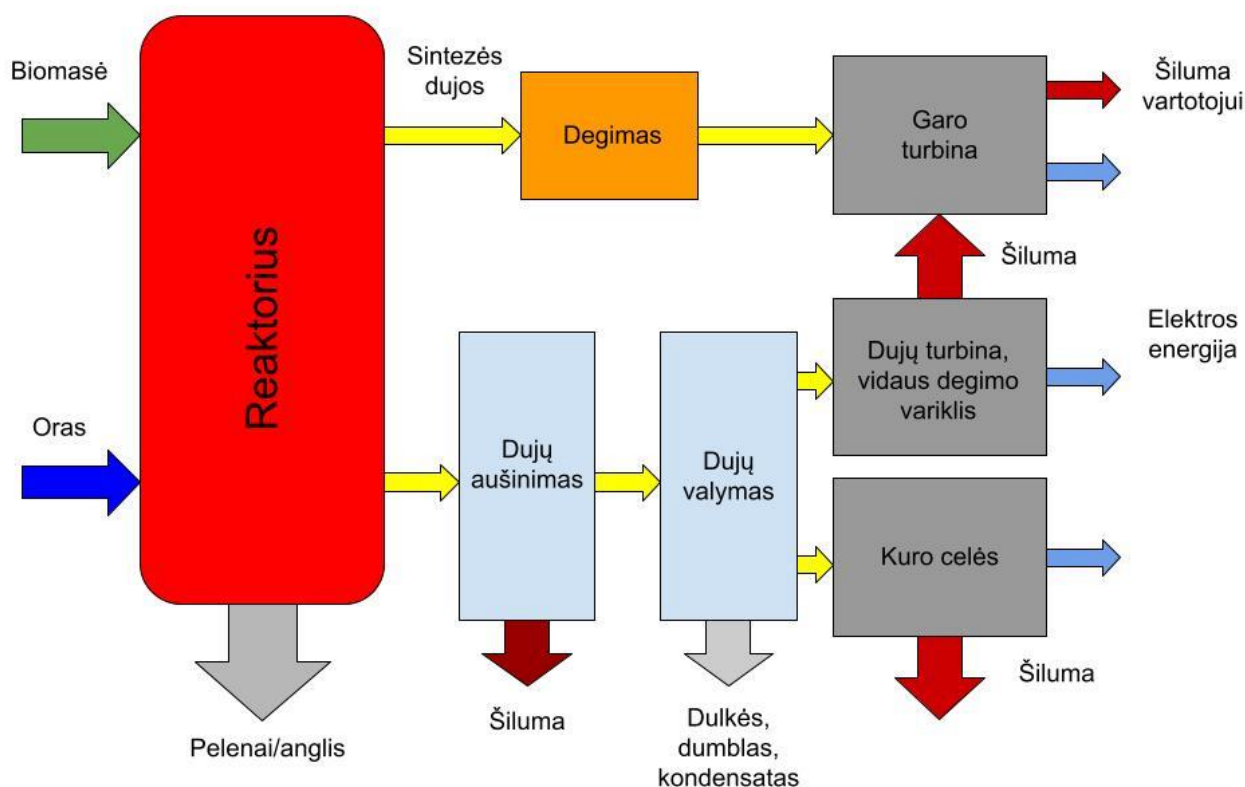
kuri skiedrų drėgmės kiekiui kintant nuo 0 % iki 25 % didėja. Degių dujų – H₂ (nuo ~13 % skiedros drėgnumo) ir CO (visame nagrinėjamame drėgmės diapazone) tūrinis sumažėjimas lemia sintezės dujų AŠV mažėjimą, kurį galima pamatyti 12 pav., šiluminė vertė krinta nuo 4,22 MJ/Nm³ iki 3,24 MJ/Nm³.

11 pav. pavaizduotas – anglies monoksido (nuo 19,18 % iki 17,56 %), vandenilio (nuo 19,29 % iki 10,74 %) ir metano (nuo 0,45 % iki 0,01 %) koncentracijų mažėjimas kylant dujinimo temperatūrai. Prie šio degių elementų tūrio kitimo prisideda N₂ koncentracijos padidėjimas nuo 48,22 % iki 59,66 %, dėl didesnio tiekiamo oro kiekio, kylant dujinimo temperatūrai nuo 700 °C iki 1100 °C. Tuo tarpu, CO₂ tūrinė dalis visame temperatūrų diapazone išlieka gana pastovi ~12 %. Sintežės dujų apatinė šiluminė vertė (13 pav.), augant dujinimo temperatūrai nuo 700 °C iki 1100 °C krinta nuo 4,67 MJ/Nm³ iki 3,38 MJ/Nm³, šį kitimą veikia minėtas degių sintezės dujų komponentų koncentracijų mažėjimas.

Apibendrinant, galima pastebėti, jog šios sintezės dujų komponentų iš šiluminių verčių kitimo tendencijos, kuomet varijuojama biokuro drėgmės kiekiu ir dujinimo temperatūra, su išlygomis yra panašios į literatūros šaltiniuose minimus termodinaminio pusiausvyros modelio tyrimų rezultatus (išskyrus metano atvejį, kai komponento koncentracija auga, o ne išlieka pastovi (apskaičiuotu atveju), didėjant biokuro drėgmės kiekiui) [20, 21, 22].

3. Biomasės dujinimo panaudojimas kombinuotai šilumos ir elektros gamybai su vidaus degimo varikliu

Reikia atkreipti dėmesį, kad bėgant laikui kokybiškos medienos kuro pradės trūkti, atsiras daugiau atliekinės biomasės ar kitų organinių atliekų, kurių tiesioginis deginimas kels didelius rūpesčius [26]. Taip pat reikia įvertinti siekį sukurti modernias ir nepriklausomas energetines sistemas bei galimybes pagaminti daugiau elektros energijos naudojant biomasės išteklius. Visa tai verčia svarstyti apie dujinimo procesų integraciją į kogeneracijos sistemas. Lietuvos energetikos kontekste, esamos biokuro rinkos ir problematiško kuro panaudojimas, pasitelkiant dujinimo technologiją, gali padėti padidinti valstybės viduje pagaminamos elektros energijos kiekį ir taip prisidėti prie valstybės energetinio saugumo didinimo. Reikia pastebėti, kad biomasės dujinimo jėgainė gali būti alternatyvi arba avarinė mažų miestelių, kaimų, gyvenviečių arba pramonės objektų apsirūpinimo energija opcija.



14 pav. Biomasės dujinimo proceso panaudojimo energijos gamybai schemos

14 pav. pavaizduota potenciali biomasės dujinimo proceso pritaikymo kogeneracijos cikluose schema [27]. Mąstant apie mažosios kogeneracijos arba mikro–kogeneracijos koncepcijas, verta atkreipti dėmesį į jėgaines, kuriose šalia dujofikavimo įrangos yra įterptas vidaus degimo variklis.

Visų pirma, dažnu atveju, kuomet dujofikavimo procesas yra integruojamas į kombinuotos šilumos ir elektros gamybos sistemą, paremtą vidaus degimo varikliu (toliau VDV), tokį ciklą yra priimtina vadinti mažuoju kogeneraciniu arba mikro–kogeneraciniu, jei naudojamas dujofikatorius –

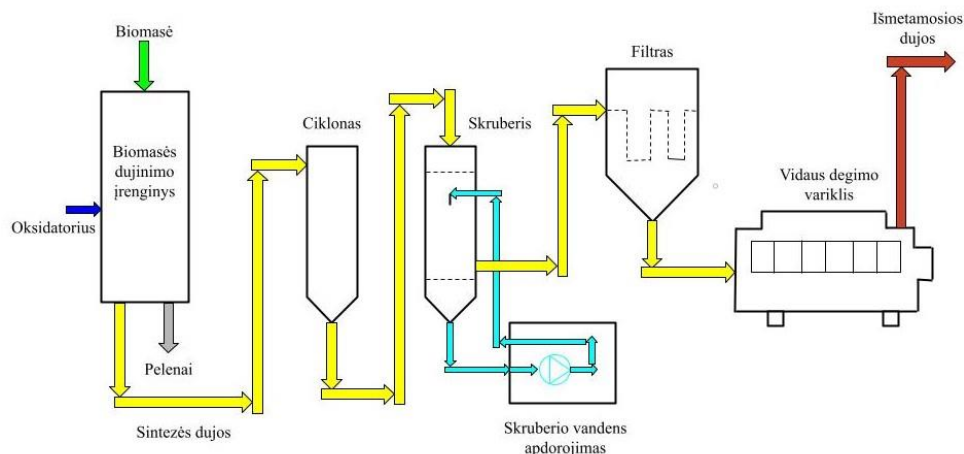
stacionaraus sluoksnio žemyn judančio srauto, nes tokio tipo dujinimo įrenginių šiluminio galingumo riba yra apie 1 MW.

Toliau nagrinėjant reikia pastebėti, kad VDV technologija atitinka ketvirtos industrinės revoliucijos koncepciją, nes turi integruotą kibernetinę sistemą, kuri leidžia kontroliuoti ir stebėti įrangos veikimą kompiuterinių tinklų pagalba, tai įgalina sumažinti pastoviuosius gamybos kaštus bei padeda pakelti saugumo ir ilgaamžiškumo charakteristikas. Be to, VDV technologija turi ir kitų privalumų [28, 29, 30]:

1. tai patikima, laiko išbandyta technologija, kurios eksploatacija yra sąlyginai paprasta;
2. tai itin efektyvi įranga, jos elektrinis efektyvumas siekia 45 – 48 % (kai naudojama jėgainėje) nuo kuro apatinės šiluminės vertės (kinta nuo kuro rūšies);
3. pasižymi greitu paleidimo laikotarpiu;
4. turi itin konkurencingą elektrinės galios lankstumą;
5. variklio galios išnaudojimo koeficientas gali siekti 0,9;
6. pasižymi gana ilgu eksploataciniu laikotarpiu (apie 25 metai), jei įranga naudojama nepilna apkrova.

Žinoma, jei VDV pritaikomas sistemoje, kurioje integruota dujofikavimo sekcija, elektrinis efektyvumas sumažėja. Keleto mokslininkų pateiktose tyrimų ataskaitose [31, 32] galima pastebėti, jog sintezės dujų deginimo VDV atveju, bendras elektrinis efektyvumas svyruoja tarp 35–45 %. Tačiau tokiu atveju yra reikalinga, kad dujų šilumingumas viršytų 4 MJ/Nm³ vertę. Taip pat verta pastebėti, jog sintezės dujos privalo būti kruopščiai valomos ir aušinamos, kad patenkintų VDV naudojimo reikalavimus: kietųjų dalelių kiekis negali viršyti 5–20 mg/Nm³, o dervų kiekis 1 mg–0.5 g/Nm³, dujų temperatūra negali būti aukštesnė nei 40 °C (priklauso nuo įrangos)[33]. Dujose esančios kietosios dalelės padidina trintį ir paspartina dėvėjimąsi, o dervos gali užkimšti įsiurbimo kolektorius ir vožtuvų lizdus. Be to, abrazyvinės dalelės gali sugadinti cilindro angą ir stūmoklio žiedus [33]. Variklio komponentų apsinešimas, gali įtakoti galios sumažėjimą. Minėtų kenksmingų elementų dujose kilmė – organinių junginių kondensacija ir pelenų dalelių išnešimas iš reaktoriaus. Taip pat reikia pastebėti – rinkai skirti VDV yra pritaikyti benzinui ir dyzelinui, todėl dažniausiai reikia modifikuoti kuro įpurškimo sistemą.

Toliau 15 pav. yra pateikta supaprastinta biomasės dujinimo jėgainės su integruotu vidaus degimo varikliu principinė schema.



15 pav. Biomasės dujinimo jėgainės su integruotu vidaus degimo varikliu principinė schema

Nedidelės galios biomasės dujinimo jėgainėje, kurioje naudojamas vidaus degimo variklis, teršalai iš dujų srauto yra pašalinami pasitelkiant:

1. ciklonus – pirminiam valymui, pašalinant dideles daleles;
2. skruberius – dervų ir kietųjų dalelių pašalinimui (be to, skruberio vandeniui yra atvėsintos, iš reaktoriaus tiekiamos įkaitusios sintezės dujos);
3. katalizatorius – dervų atskyrimui iš dujų srauto;
4. rankovinius filtrus – labai mažų dalelių pašalinimui.

Paprastai, naudojant mažos galios dujofikavimo įrenginius su vidaus degimo varikliais, sintezės dujų temperatūra yra sumažinama iki maždaug 35 °C (priklauso nuo įrangos). Dujų vėsinimui naudojant skruberį, atsiranda panaudoto vandens valymo poreikis, kadangi jame yra kenksmingų medžiagų: chloro, fluoro, sieros junginių ir kitų nepageidaujamų teršalų [34]. Šie elementai privalo būti pašalinami prieš išleidžiant vandenį į aplinką arba nuotekų tinklus.

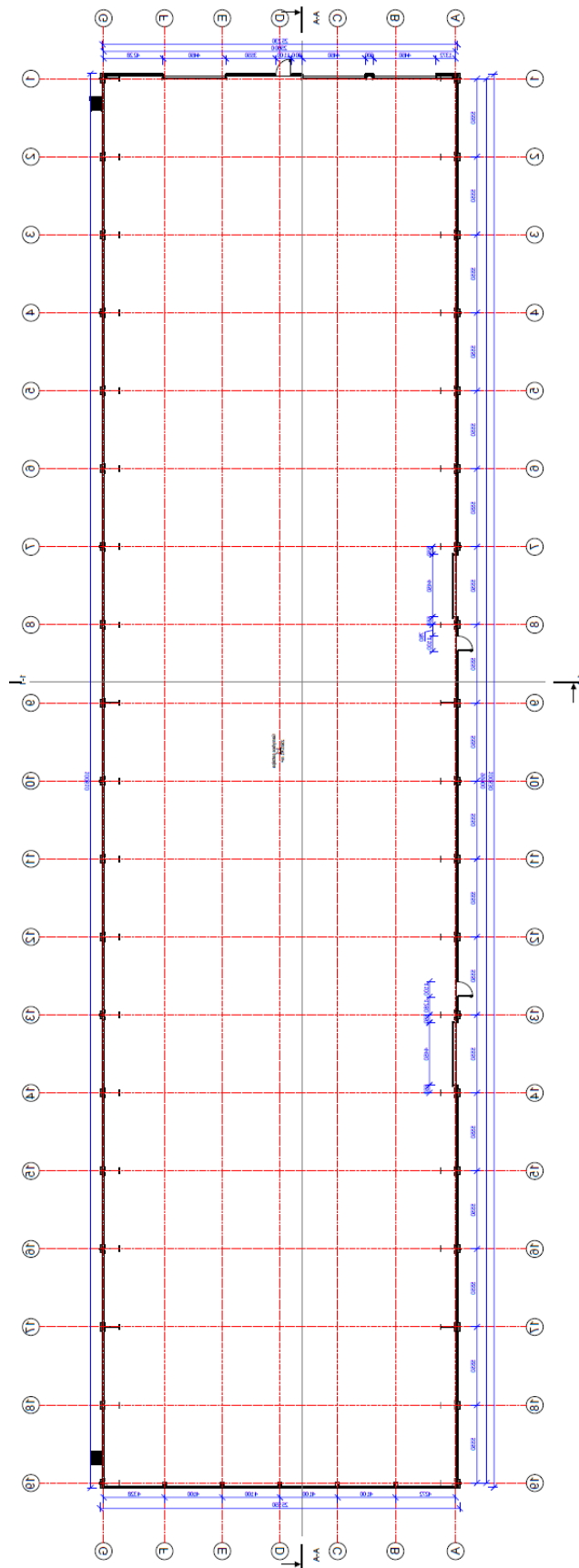
Reikia pabrėžti, kad jei biomasės dujinimo jėgainės koncepcijoje yra panaudojamas stacionarus sluoksnio žemyn judančio srauto dujofikatorius, techniniai iššūkiai ir išlaidos pagamintų dujų apdorojimui smarkiai sumažėja, kadangi dervų ir kitų teršalų kiekis yra žemas.

3.1. Įmonės energijos poreikių tenkinimas biomasės mikro–kogeneracine dujinimo jėgaine

Mikro–kogeneracija – kombinuota šilumos ir elektros gamyba, kai generavimo įrenginiai yra mažesnės nei 50 kW elektrinės galios [35]. Anksčiau minėta, jog šis energijos gamybos principas yra itin aktualus šiomis dienomis, kai nacionalinė (Nacionalinė energetinės nepriklausomybės strategija [5]) ir europinė (Europos žaliasis kursas) energetikos politika yra orientuota investuoti į aplinką tausojančias technologijas, mažinti energetikos sektoriaus priklausomybę nuo iškastinio kuro, didinti energijos sistemų saugumą ir nepriklausomumą, skatinti atsinaujinančių energijos išteklių naudojimą įvairių energijos rūšių gamybai bei išplėsti gaminančių vartotojų tinklą [36].

Tolimesnių skyrelių tikslas – įvertinti, ar biomasės mikro–kogeneracinė dujinimo jėgainė yra techniškai ir ekonomiškai patrauklus pasirinkimas įmonėms, kurios siekia apsirūpinti energija ir būti dalinai nepriklausomomis nuo išorės veiksnių.

Pasirinktas nagrinėjamas atvejis – 2 500 m² ploto gamybinės patalpas turinti įmonė. Jos patalpų planas pateikiamas toliau esančiame 16 pav. Šiluminę energiją įmonė perka iš centralizuotų šilumos tinklų, o elektros energiją iš žemos įtampos elektros tinklų.



16 pav. Įmonės pastato planas

Pastato energetinė klasė – B, o metinės šiluminės energijos sąnaudos pastatui (jo daliai) šildyti – 140 kWh/(m²·metai). Pagal statybos techninio reglamento STR 2.01.02:2016 „Pastatų energinio

naudingumo projektavimas ir sertifikavimas“ [37], B, A, A+ ir A++ energinio naudingumo klasės pastatų (jų dalių) norminės šiluminės energijos sąnaudų pastatui (jo daliai) šildyti lentelę, B energetinės klasės, garažų, gamybos ir pramonės paskirties pastatų norminės šiluminės energijos sąnaudos – 144,4 kWh/(m²·metai) (Pastato aukštis – 8 metrai).

Metinis pastato šiluminės energijos poreikis:

$$Q_{\text{įmonės.šil.poreik.}} = Q_m^{\text{š}} \cdot A_p = 140 \cdot 2500 = 350\,000 \text{ kWh/metus} = 350 \text{ MWh/metus.} \quad (28)$$

čia $Q_m^{\text{š}}$ – metinės šiluminės energijos sąnaudos pastatui (jo daliai) šildyti, kWh/(m²·metai); A_p – pastato plotas, m².

Statybos techniniame reglamente nurodyta [37], jog garažų, gamybos ir pramonės paskirties pastatų metinis šiluminės energijos poreikis karštam vandeniui gaminti 1 m² pastato – 10 kWh/(m²·metai).

Metinis pastato šiluminės energijos poreikis karšto vandens ruošimui:

$$Q_{\text{įmonės.k.v.poreik.}} = \psi_{k.v.} \cdot A_p = 10 \cdot 2\,500 = 25\,000 \text{ kWh/metus} = 25 \text{ MWh/metus.} \quad (29)$$

čia $\psi_{k.v.}$ – metinis šiluminės energijos poreikis karštam vandeniui gaminti 1 m² pastato, kWh/(m²·metai).

Įmonės metinis šiluminės energijos poreikis $Q_{\text{bendr.š.poreik.}}$ – 375 MWh/metus.

B energetinio efektyvumo klasės pastatui reikalingas šilumos srauto tankis – 40 W/m² [37], tokiu atveju, maksimali šildymo galia – 100 kW.

Skaičiuojant elektros energijos suvartojimą, priimame, jog vidutinis valandinis elektros energijos poreikis darbo dienomis – $Q^e_{\text{darbo valandos}} = 0,135 \text{ MWh}$, jei priimsime, jog įmonė dirba 8 valandas per dieną, darbo valandų elektros poreikis – 1,08 MWh. Tuo tarpu, įmonės naktinis (darbo dienų) ir nedarbo dienų valandos vidutinis elektros energijos poreikis – $Q^e_{\text{nedarbo valandos}} = 0,01 \text{ MWh}$ (apšvietimas ir kiti pastato bei įrangos poreikiai, be to, įvertinama, jog kartais dirbama ilgiau nei 8 valandos per parą). Tad metinis tokio objekto elektros energijos poreikis :

$$Q_{\text{bendr.el.poreik.}} = Q^e_{\text{darbo valandos}} \cdot t_{\text{darbo valandų}} \cdot n_{\text{darbo dienų}} + Q^e_{\text{ne darbo valandos}} \cdot t_{\text{ne darbo valandų}} \cdot n_{\text{darbo dienų}} + Q^e_{\text{ne darbo valandos}} \cdot t_{\text{paros val.skaičius}} \cdot (n_{\text{metų dienų skaičius}} - n_{\text{darbo dienų}}) = 0,135 \cdot 8 \cdot 252 + 0,01 \cdot 16 \cdot 252 + 0,01 \cdot 24 \cdot (365 - 252) = 339,6 \text{ MWh/metus.} \quad (30)$$

čia $Q_{\text{darbo valandos}}$ – vidutinis darbo valandos šiluminės energijos poreikis, MWh; $t_{\text{darbo valandų}}$ – darbo valandų skaičius per parą, h; $n_{\text{darbo dienų}}$ – darbo dienų skaičius metuose (priimama pagal šių metų skaičių – 252); $Q_{\text{ne darbo valandos}}$ – ne darbo valandos šilumos energijos poreikis, MWh; $t_{\text{ne darbo valandų}}$ – ne darbo valandų skaičius per parą, h; $n_{\text{paros val.skaičius}} = 24 \text{ h}$; $n_{\text{metų dienų skaičius}} = 365$.

6 lentelė. Įmonės energijos poreikiai per metus

Energijos rūšis	Poreikis, MWh
Elektros	339,6
Šiluminė	375

Šiems elektros ir šiluminės energijos poreikiams tenkinti bus įrengiama gamintojo – „Spanner Re²“ mažos galios, biomasės dujinimo principu veikianti jėgainė [38].

Reikia pabrėžti, jog tokio tipo mikro–kogeneracinė jėgainė nėra priklausoma nuo kintamųjų energijos šaltinių – saulės, vėjo ir kitų, ir gali dirbti bei aprūpinti objektą elektros energija netgi tuomet, kai elektros energijos tinklai yra pažeisti, tad toks elektros generatorius gali būti laikomas ir avariniu. Žinoma, tokia įranga turi trūkumų, lyginant ją, pavyzdžiui, su saulės fotovoltiniais elementais, kurie neturi judančių dalių, nenaudoja kuro ir nereikalauja didelių aptaranavimo kaštų.

Minėtas jėgainių gamintojas siūlo tris, skirtingų šilumos ir elektros generavimo galių jėgainių variantus, kurie pateikiami 7 lentelėje (pagal 2 priedą).

Jėgainės galios reguliavimo diapazonas nėra galimas, tai reiškia, jog įranga dirba maksimaliu pajėgumu arba yra išjungta.

Priimame, jog per metus, pasirinkta jėgainė dirbs $t = 7\ 000$ h. Kaip teigia gamintojas [38], šie įrenginiai per metus gali dirbti apie 8 000 h ir ilgiau, pasitaiko, jog įranga eksploatuojama ir dar ilgiau, yra atvejų, kuomet pasiekiamas 98 % metinis laiko išnaudojimas. Priimtas darbo valandų skaičius mažesnis nei maksimalus siūlomas gamintojo, nes norima pasiekti maksimalų įrangos eksploatavimo laiką – 25 metus.

7 lentelė. Biomasės dujinimo jėgainių galingumai ir pagaminami energijos kiekiai per metus

Varianto Nr.	Jėgainės techniniai parametrai			
	Šilumos gamybos galia (įkaitusių sintezės dujų aušinimo šiluma ir vidaus degimo variklio aušinimo skysčio, išmetamųjų dujų ir tepalo šiluma), kW	Elektros gamybos galia, kW	Metinis jėgainės pagaminamas šilumos kiekis (7000 h), kWh	Metinis jėgainės pagaminamas elektros kiekis (7000 h), kWh
1.	79,5	35	556 500	245 000
2.	102,2	45	715 400	315 000
3.	111,3	49	779 100	343 000

Apskaičiuoti jėgainių pagaminami šilumos energijos kiekiai, rodo, jog visi trys jėgainės variantai gali padengti metinį šilumos energijos poreikį, tačiau 1 variantas neužtikrina maksimalios objekto šildymo galios – 100 kW. 2 variantas šį kriterijų tenkina, tačiau turi nedidelį galios rezervą. Tuo tarpu, 3 variantas užtikrina šildymo galią ir turi ~11 kW rezervą.

Apskaičiuoti jėgainių pagaminami elektros energijos kiekiai rodo, jog vienintelis 3 jėgainės variantas patenkina objekto metinius elektros energijos poreikius, žinoma, tam būtina naudotis elektros pasaugojimo tinkluose paslauga. Šio būdo analizė pateikiama toliau esančiame 3.5 skyrelyje.

Pagal apskaičiuotus duomenis, objekto energijos poreikių užtikrinimui pasirenkame trečiąjį jėgainės variantą.

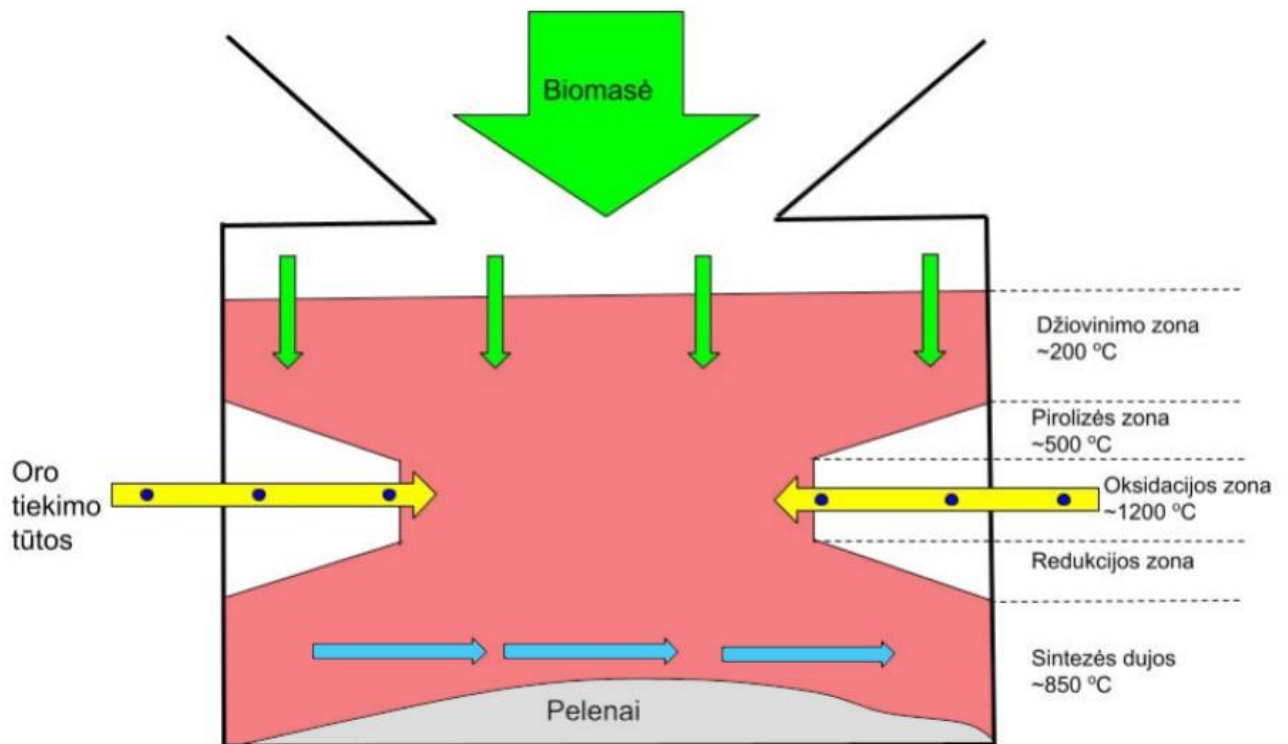
Priimame, jog jėgainė šildymo sezono metu dirba su mažomis pertraukomis, kurios reikalingos einamosioms procedūroms atlikti, pavyzdžiui, tepalų keitimui. Įmonės darbo valandomis jėgainė užtikrina komfortiškas darbo sąlygas patalpose. Toks objektas, dažnu atveju turi turėti ir kitą, rezervinį šilumos šaltinį, kuris esant poreikiui užtikrintų patalpų šildymą, kuomet jėgainės įranga neveikia arba yra remontuojama.

Verta pastebėti, jog sklandžiam jėgainės veikimui vasarą yra reikalinga nuvesti perteklinę šilumos energiją į aplinką, kadangi šiltuoju metų laiku, reikalingas tik karšto vandens ruošimas. Tam tikslui yra įrengiama vanduo/oras aušyklė. Norint geriau įsisavinti jėgainės pagamintą šilumą ir padengti atsirandančius vartojimo pikus galima įsirengti akumuliacinę talpą. Tolimesniame ekonominiame skaičiavime, aušyklės ir kitos įrangos įsigijimas bus įvertintas atskiru procentu nuo jėgainės kainos.

3.2. Biomasės dujinimo jėgainės įranga

Pagrindiniai biomasės dujinimo jėgainės įrenginiai [38] :

1. kuro tiekimo įranga: kuro sandėlis; kuro sraigtinis transporteris, kuro kamera (bunkeris) su uždaromosiomis sklendėmis ir metaline kuro priemaišų gaudykle, pagrindinis dujinimo įrenginio maitinimo sraigtinis transporteris;
2. biomasės dujinimo reaktorius su priklausiniais (17 pav.): žemyn judančio srauto stacionaraus sluoksnio tipo dujofikatorius, šilumokaičių sistema (skirta pašildyti į reaktorių paduodamą orą bei atvėsinti ir naudingai panaudoti įkaitusių sintezės dujų šilumą), oro kompresorius (užtikrinantis oksidatoriaus tiekimą ir pneumatinių komponentų veikimą), rankovinis filtras (kuris turi sugaudyti nepageidaujamas kietąsias daleles, dervas ir koksą), antrinė nedujofikuotos anglies apdorojimo įranga (papildoma opcija), avarinis filtras (kuris esant filtro gedimui užtikrina jėgainės veikimo saugumą);



17 pav. Biomasės dujinimo reaktoriaus principinė schema

3. vidaus degimo variklis (kogeneratorius) (darbinis tūris – 8 litrai, konstrukcijos tipas – V raidės, cilindrų skaičius – 8, taktų skaičius – 4, naudojamas ciklas – Otto, nominalus greitis – 1 520 1/min). Kartu su kogeneraciniu įrenginiu yra komplektuojama: oru aušinamas asinchroninis elektros generatorius, katalizatorius, šilumokaičiai (kuriuose vėsinamas vidaus degimo variklio aušinimo skystis, išmetamosios dujos ir tepalas) bei elektros ir elektronikos prietaisai (skirti valdyti visą sistemą).

8 lentelė. Pagrindiniai biomasės dujinimo jėgainės parametrai

Techninis parametras	Vertė	Matavimo vienetas
Vidaus degimo variklio šiluminė galia	98	kW
Dujinimo įrenginio šiluminė galia	13,3	kW
Elektros generavimo galia	49	kW
Bendra jėgainės galia	160,3	kW
Šiluminis jėgainės naudingumas	56,1	%
Elektrinis jėgainės naudingumas	24,7	%
Bendras jėgainės naudingumas	80,7	%

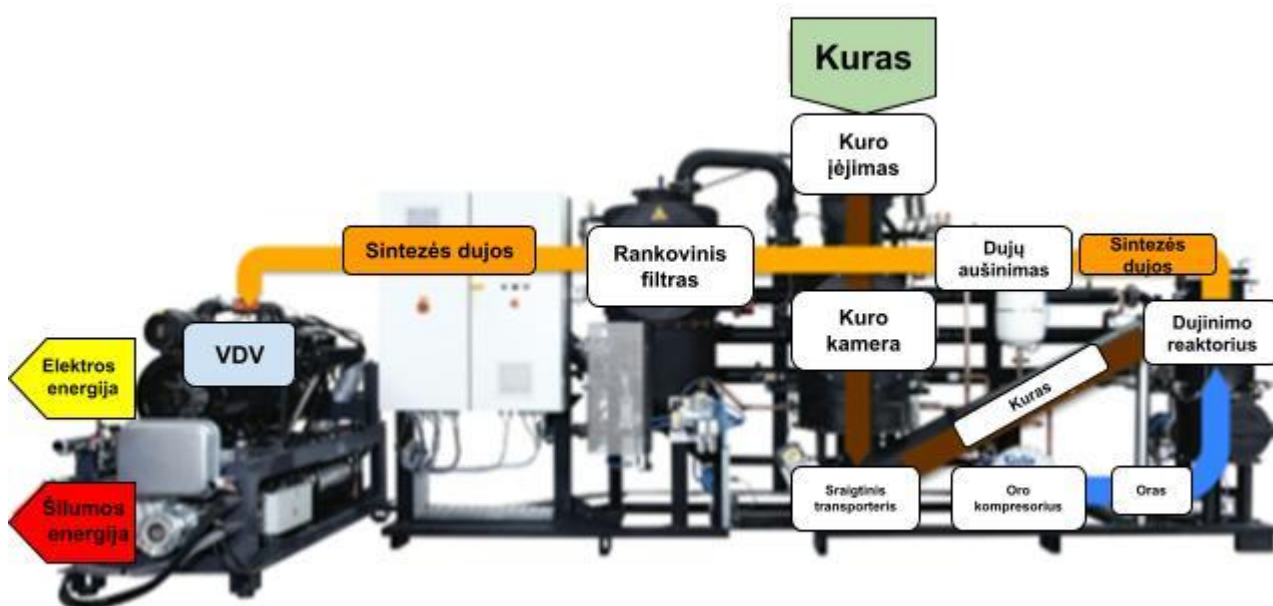
Detalesnės įrangos techninės charakteristikos, technologinės ir įrangos išdėstymo schemos yra pateikiamos 2 ir 3 prieduose.

3.3. Biomasės dujinimo jėgainės veikimo principas

Toliau pateikiama jėgainės principinė schema (18 pav.) [39]. Matome, jog iš pradžių, sraigtiniu transporteriu iš sandėlio tiekiamas kuras patenka į dujinimo įrenginio kuro bunkerį. Šio bunkerio pagrindinė funkcija – garantuoti nepertraukiamą biokuro tiekimą į biomasės dujinimo reaktorių. Kuro transportavimui yra naudojamas bunkerio apačioje įrengtas sraigtinis transporteris, kuris tiekia biokurą į dujofikatoriaus viršutinę dalį. Kitas svarbus ir dujinimo reakcijai reikalingas komponentas – oras yra tiekiamas naudojant kanalinių kompresorių. Prieš patekdamas į dujofikatorių, oras yra pašildomas ir tik vėliau per specialias tūtas yra tiekiamas tiesiai į oksidacijos zoną.

Kurui patekus į dujofikavimo indą prasideda 4 procesų eiga, iš pradžių kuras džiūsta zonoje, kurioje palaikoma ~200 °C temperatūra, vėliau ~200–500 °C temperatūroje jis yra pirolizuojamas, trečioje zonoje, ~500–1200 °C temperatūroje vyksta oksidacijos procesai, o galiausiai, paskutinėje pakopoje – anglies dujinimo, ~800 °C temperatūroje vyksta esminės anglies dujinimo reakcijos. Karštos (~850 °C temperatūros) sintezės dujos, pelenai ir likutinė anglis – pašalinamos per apatinę reaktoriaus indo dalį. Toliau, dujos/oras ir dujos/vanduo šilumokaičiuose, pagamintos sintetinės dujos yra vėsintos iki ~130 °C temperatūros. Ataušintos dujos keliauja į rankovinį filtrą, kuriame sugaunamos variklyje nepageidaujamos kietosios (pelenų) dalelės ir anglies koksas. Likutinis koksas ir pelenai sraigtiniu transporteriu yra tiekiami į antrinio apdoravimo įrenginį (tai papildoma jėgainės įranga, be kurios jėgainė gali pilnai funkcionuoti), kuriame anglies dalelės yra sudeginamos. Pelenai iš šio įrenginio yra pašalinami sraigtiniu transporteriu į specialiai pritaikytą talpą.

Gamintojo pateiktoje informacijoje [38, 39], taip pat galima rasti, jog sintezės dujos, papildomame dujos/vanduo šilumokaityje yra atvėsintos iki ~90 °C temperatūros. Dujų vėsavimo metu gautas šilumos kiekis, gali būti panaudojamas drėgno kuro džiovinimo procesui (kadangi, į reaktorių paduodamo kuro drėgnumas turi būti ne didesnis nei 13 %). Norint užtikrinti vidaus degimo variklio veikimo saugumą yra įrengiamas avarinis filtras. Galiausiai, apdorotos sintetinės dujos yra sumaišomos su oru ir tiekiamos į kogeneracinį įrenginį – Otto ciklu veikiančią vidaus degimo variklį, kurio alkūninis velenas suka asinchroninį elektros generatorių ir gamina elektros energiją. Tuo tarpu, šiluminė energija, šilumokaičių pagalba yra gaunama vėsinant variklio aušinimo skystį, išmetamąsias variklio dujas ir tepalą bei panaudojant sintezės dujų aušinimo energiją. Grįžtančio vandens srauto temperatūra yra pakeliama nuo ~65 °C iki ~85 °C ir tiekiami į šildymo ir karšto vandens ruošimo sistemas.



18 pav. Biomasės dujinimo jėgainės principinė schema [39]

3.4. Biomasės dujinimo jėgainės naudojamas kuras

Biomasės dujinimo jėgainės gamintojas teigia [38], jog į įrenginį galima tiekti įvairių medienos kurą – medienos skiedrą, miško kirtimo atliekas, pakelės želdinius, (apdorotus) susmulkintas vaisių laikymo dėžutes arba medines sandėliavimo paletes. Kuras turi būti apdorotas, galimos trys jo formos:

1. briketai (elementų sąlyginis diametras apie 30 mm);
2. medienos biokuras (skiedros), kuris atitinka DIN ISO 17225-1 standartą (Frakcijos dydis – P31S, smulkelių frakcijos dydžio dalis biokure – ne daugiau 10 % (F10), drėgnumas nuo naudojamosios masės – ne daugiau 10 % (M10), peleningumas – ne daugiau 1 % (A1.0).
3. granulės.

Reaktoriuje vykstančiam dujinimo procesui svarbu, jog biomasės drėgnumas neviršytų 13 % [38], kitu atveju prasideda dujinimo reaktoriaus temperatūriniai sutrikimai, padidėja dervų kiekis bei tampa neįmanomas sklandus veikimo procesas. Taip pat svarbu, jog smulkelių (<4 mm) kiekis kure neviršytų 30 %, nes padidėja nedujofikuotos anglies kiekis. Verta paminėti ir vengtiną kuro priemaišas – metalus, akmenis bei smėlį, kurios gali mechaniškai pažeisti įrangą.

3.5. Jėgainės pagaminamos elektros energijos pasaugojimo tinkluose poreikis

Galima pabrėžti, jog pasirinkta jėgainė visiškai patenkina objekto metinius elektros energijos poreikius, tačiau žinant, jog įranga neužtikrina momentinio darbo valandų elektros poreikio bei per metus dirba 7 000 h (valandų skaičius per metus – 8 760 h), įmonei atsiranda būtinybė tapti gaminančiu vartotoju.

Jei darbo dienomis (252 dienos), 8 valandas, jėgainė dirba nepertraukiamai, tokiu atveju, darbo valandų skaičius – 2 016 h/metus, o darbo valandomis sugeneruotas elektros energijos kiekis – 98,8 MWh/metus. Nakties metu ir nedarbo dienomis jėgainės veikimo valandų skaičius – 4 984 h. Nakties

metu ir nedarbo dienomis jėgainės sugeneruotas elektros energijos kiekis (atmetus suvartojimą) – $Q_{pasaugojimo}^{el} = 194,4$ MWh/metus. Vadinasi, tokį kiekį per metus teks patiekti į tinklą pasaugojimui.

Šiuo metu, už AB „Energijos skirstymo operatorius“ (ESO) teikiamą elektros energijos pasaugojimo paslaugą galima atsiskaityti keturiais skirtingais būdais [40]:

- atsiskaitant už atgautą energijos kiekį, kai mokama už patiektos į tinklą ir vėliau atgautos elektros energijos kilovatvalandę (kWh) [40];
- atsiskaitant už įrengtąją elektrinės galią, kai mokama už įrengtą elektrinės generuojamos galios kilovatą (kW) [40];
- atsiskaitant mišriu būdu, kai mokama už patiektos į elektros tinklus ir vėliau atgautos elektros energijos kilovatvalandę (kWh) ir už instaliuotą elektrinės generuojamos galios kilovatą (kW) [40];
- atsiskaitant kilovatvalandėmis, kiekiu pagal procentus. Atsiskaitymas kilovatvalandėmis: nustatytas procentas nuo patiektos į tinklus energijos kiekio (kWh) paliekamas operatoriui už naudojimosi tinklais paslaugas. Klientas gali neatlygintinai atgauti nustatytą procentą nuo savo pagaminto ir patiekto į tinklą energijos kiekio [40].

Toliau įvertiname, kuris iš atsiskaitymo metodų būtų pats tinkamiausias nagrinėjamu atveju.

Jei mokėsime už patiektos į tinklą ir vėliau atgautos elektros energijos kilovatvalandę (kWh), kai tarifas naudojantis žemos įtampos tinklais – $s_{pasaugojimo} = 0,05445$ Eur/kWh (su PVM) = 54,45 Eur/MWh (su PVM), metinė pinigų suma bus:

$$Suma_{1 \text{ būdas}} = Q_{pasaugojimo}^{el} \cdot s_{pasaugojimo} = 194,4 \cdot 52,03 = 10\,585 \text{ Eur/metus.} \quad (31)$$

Jei mokėsime už įrengtą elektrinės generuojamos galios kilovatą (kW), kai tarifas naudojantis žemos įtampos tinklais – $s_{galios} = 3,1944$ Eur/kW/mėn (su PVM), metinė pinigų suma bus:

$$Suma_{2 \text{ būdas}} = Q_{el} \cdot s_{galios} \cdot 12 = 49 \cdot 3,1944 \cdot 12 = 1\,878 \text{ Eur/metus.} \quad (32)$$

Jei mokėsime už patiektos į elektros tinklus ir vėliau atgautos elektros energijos kilovatvalandę (kWh) ir už instaliuotą elektrinės generuojamos galios kilovatą (kW), kai tarifai naudojantis žemos įtampos tinklais – $s_{pasaugojimo(2)} = 0,02662$ Eur/kWh (su PVM) = 26,62 Eur/MWh (su PVM) ir $s_{galios(2)} = 1,5792$ Eur/kW/mėn (su PVM), metinė pinigų suma bus:

$$Suma_{3 \text{ būdas}} = Q_{pasaugojimo}^{el} \cdot s_{pasaugojimo(2)} + Q_{el} \cdot s_{galios(2)} \cdot 12 = 194,4 \cdot 26,62 + 49 \cdot 1,5792 \cdot 12 = 6\,114 \text{ Eur/metus.} \quad (33)$$

Ketvirtuoju atsiskaitymo būdu, už naudojimosi tinklais paslaugas operatoriui sumokėtume 41 % nuo pateiktos į tinklus energijos kiekio (MWh), šiuo atveju tai sudarytų: $Q_{por.po \text{ ats.su operat.}}^{el} = 79,7$ MWh/metus. Vadinasi, tokį kiekį elektros energijos reikėtų įsigyti iš tinklų, kad pavyktų patenkinti metinius elektros energijos poreikius. Eurostat duomenys, kurie rodo [41], jog 2020 m. vidutinio dydžio, ne namų ūkio objektai (komerciniai vartotojai) Lietuvoje už elektrą vidutiniškai mokėjo – $s_{elektros} = 0,1054$ Eur/kWh (su PVM) = 105,4 Eur/MWh (su PVM). Tokiu atveju reikalinga pinigų suma:

$$Suma_{4 \text{ būdas}} = Q_{por.po \text{ ats.su operat.}}^{el} \cdot s_{elektros} = 79,7 \cdot 105,4 = 8\,400 \text{ Eur/metus.} \quad (34)$$

9 lentelė. Gaminančio vartotojo mokėtinų sumų palyginimas

Atsiskaitymo būdas	Mokama suma per metus, Eur
Už atgautą energijos kiekį	10 585
Už įrengtąją elektrinės galią	1 878
Mišriu būdu, kai mokama už patiektos į elektros tinklus ir vėliau atgautos elektros energijos kilovatvalandę	6 114
Atsiskaitymas kilovatvalandėmis	8 400

Atlikti atsiskaitymo būdų įvertinimo skaičiavimai rodo, jog geriausias variantas yra mokėti už įrengtą elektrinės generuojamos galios kilovatą (kW) – 1 878 Eur/metus.

Jei elektrą pirkume tik iš tinklų, mokama suma būtų:

$$Suma_{visa\ el.\ iš\ tinklų} = Q_{bendr.\ el.\ poreik.} * S_{elektros} = 339,6 * 105,4 = 35\ 791\ \text{Eur/metus.} \quad (35)$$

Metiniai sutaupymai dėl to, jog elektros energija yra neperkama iš tinklų:

$$S_{už\ elektrą} = Suma_{visa\ el.\ iš\ tinklų} - Suma_{2\ būdas} = 35\ 791 - 1\ 878 = 33\ 913\ \text{Eur/metus.} \quad (36)$$

3.6. Jėgainės projekto ekonominiai skaičiavimai

Nagrinėjamos jėgainės (sukomplektuotos eksploatacijai) (49 kW_e) kaina, įskaitant montavimą ir paleidimą [38]:

$$IK_{jėg} = 200\ 000\ \text{Eur.} \quad (37)$$

Laikome, jog projektavimo darbai kainuoja 2 % nuo jėgainės kainos:

$$IK_{proj} = 200\ 000 \cdot 0,02 = 4\ 000\ \text{Eur.} \quad (38)$$

Vanduo/oras aušyklės ir kitų komponentų (pvz.: akumuliacinės talpos) įsigijimą įvertiname 5 % nuo jėgainės kainos:

$$IK_{papildoma\ įranga} = 200\ 000 \cdot 0,05 = 10\ 000\ \text{Eur.} \quad (39)$$

Tokiu atveju, suminiai jėgainės įrengimo kaštai:

$$IK_S = IK_{jėg} + IK_{proj} + IK_{papildoma\ įranga} = 200\ 000 + 4\ 000 + 10\ 000 = 214\ 000\ \text{Eur.} \quad (40)$$

Analizuojant 2014–2020 metų ES fondų investicijos programas ir finansuotus projektus, tokio tipo jėgainės įrengimui galima tikėtis iki 50 % paramos pagal naujas 2021–2027 metų ES fondų investicijas [42]. Kitas įmanomas dalinio finansavimo šaltinis yra Lietuvos Respublikos Aplinkos ministerijos aplinkos projektų valdymo agentūros vykdomos klimato kaitos programos kvietimas [43], kurio skiriamas finansavimo intensyvumas gali siekti iki 30 % visų tinkamų finansuoti projekto išlaidų. Tolimesniame skaičiavime, priimame, jog paramos gaunama iš ES fondų investicinių programų siekia 50 %, tai nagrinėjamu atveju sudarytų – 107 000 eurų.

Laikome, jog likusią investiciją įmonė padengs nuosavomis lėšomis.

Priimame, jog jėgainės eksploatavimo laikas maksimalus – 25 metai, dėl to, jog priėmėme mažesni nei maksimalus metinį įrangos apkrovimą – 7 000 h.

Metinės išlaidos atlyginimams, kai pagal gamintojo rekomendaciją (4 priedas), laikome, jog už vieną pagamintą 1 kW_e mokama – $s_{atlyginimai} = 0,008 \text{ Eur/kWh} = 8 \text{ Eur/MWh}$:

$$I_{\text{atlyginimai}} = Q_{\text{maks.el.jėg.}} \cdot s_{\text{atlyginimai}} = 343 \cdot 8 = 2\,744 \text{ Eur/metus.} \quad (41)$$

Metinės išlaidos dėl detalių dėvėjimosi, kai pagal gamintojo rekomendaciją (4 priedas), laikome, jog už vieną pagamintą 1 kW_e mokama – $s_{dėvėjimas} = 0,022 \text{ Eur/kWh} = 22 \text{ Eur/MWh}$:

$$I_{\text{dėvėjimas}} = Q_{\text{maks.el.jėg.}} \cdot s_{\text{dėvėjimas}} = 343 \cdot 22 = 7\,546 \text{ Eur/metus.} \quad (42)$$

Kitos metinės išlaidos (pavyzdžiui, draudimui) yra įvertinamos 0,5 % nuo jėgainės įrengimo kainos:

$$I_{\text{kitos}} = I_{K_s} \cdot 0,005 = 1\,070 \text{ Eur/metus.} \quad (43)$$

Toliau, atliekame išlaidų kuro įsigijimui skaičiavimą. Įrangos gamintojas teigia, kad naudojamas kuras turi atitikti DIN ISO 17225–1 standartą [38]. Šio standarto kriterijus atitinka spygliuočių medienos biokuras [44], kurio sausosios masės sudėtis pateikta toliau esančioje 10 lentelėje:

10 lentelė. Biokuro sausosios masės komponentinė sudėtis

Sausosios masės sudėtis, %					
C ^s	H ^s	S ^{s_d}	O ^s	N ^s	A ^s
51	6,3	0,02	42,28	0,1	0,3

Pasinaudodami biokuro biržos „Baltpool“ produktų duomenimis [45], randame, jog tinkamiausias naudoti biokuras – SM1. SM1 tipo kuro kaina yra priimama pagal „Baltpool“ biokuro biržos 2020 metų prekybos apžvalgą [46] – $s_{\text{biokuras}} = 12,9 \text{ Eur/MWh}$ (su PVM).

Skaičiuojant kuro naudojamosios masės sudėtį priimame, jog drėgmės kiekis – 9 % (bus reikalingas nupirkto kuro džiovinimas). Perskaičiuota naudojamosios masės sudėtis pateikta toliau esančioje 11 lentelėje:

11 lentelė. Biokuro naudojamosios masės komponentinė sudėtis

Naudojamosios masės sudėtis, %						
C ⁿ	H ⁿ	S ^{n_d}	O ⁿ	N ⁿ	A ⁿ	W ⁿ
46,41	5,73	0,018	38,17	0,09	0,27	9

Tokio kuro apatinis šilumingumas:

$$Q_{a.\text{biokuras}}^n = 339 C^n + 1\,035 H^n - 109(O^n - S_d^n) - 25 W^n = 339 \cdot 46,41 + 1\,035 \cdot 5,73 - 109(38,17 - 0,018) - 25 \cdot 9 = 17\,249,9 \text{ kJ/kg.} \quad (44)$$

čia C^n , H^n , O^n , S_d^n , W^n – anglies, vandenilio, deguonies, sieros ir drėgmės procentinė dalis naudojamajoje biokuro masėje.

Sunaudojamas biokuro kiekis:

$$B_{biokuras(1)} = \frac{Q_n}{Q_a^n \cdot \eta_{bendras}} = \frac{160}{17\,249,9 \cdot 0,807} = 0,0115 \text{ kg/s} = 41,38 \text{ kg/h} \quad (45)$$

čia Q_n – bendra jėgainės galia, kW; $\eta_{bendras}$ – bendras jėgainės naudingumo koeficientas.

Metinis suvartojamo biokuro kiekis, kai jėgainė dirba 7000 h: $B_{biokuras(2)} = 289\,641,66 \text{ kg/metus} = 289,64 \text{ t/metus}$.

Reikalingas pirminės energijos kiekis per metus:

$$Q_{pirminė \text{ energija}} = B_{biokuras(2)} \cdot Q_a^n_{biokuras} = 289\,641,66 \cdot 17\,249,9 = 1\,387,86 \text{ MWh/metus.} \quad (46)$$

Metinės išlaidos kurui:

$$I\check{s}_{biokuras} = Q_{pirminė \text{ energija}} \cdot S_{biokuras} = 1\,387,86 \cdot 12,9 = 17\,903 \text{ Eur/metus.} \quad (47)$$

Metinės eksploatacinės išlaidos:

$$I\check{s}_s = I\check{s}_{atlyginimai} + I\check{s}_{dėvėjimasis} + I\check{s}_{kitos} + I\check{s}_{biokuras} = 2\,744 + 7\,546 + 1\,070 + 17\,903 = 29\,263 \text{ Eur/metus.} \quad (48)$$

Taip pat įvertiname, jog objektas sutaupo lėšų dėl neperkamos šilumos energijos iš centralizuotų šilumos tinklų. Skaičiavimui priimama, jog šilumos kainos tarifas (Pagal Valstybinės energetikos reguliavimo tarybos duomenis [47], vidutinė centralizuotai tiekiamos šilumos kaina 2020 metais, su 21 % PVM): $S_{šilumos} = 0,048 \text{ Eur/kWh} = 48 \text{ Eur/MWh}$.

Metiniai sutaupymai dėl šilumos energijos nepirkimo iš tinklų:

$$Suma_{visa \text{ š. iš tinklų}} = Q_{bendr. š. poreik.} \cdot S_{šilumos} = 375 \cdot 48 = 18\,000 \text{ Eur/metus.} \quad (49)$$

Siekiant kuo optimalesnį jėgainės ekonominio vertinimo yra pasitelkiami baziniai ekonominio efektyvumo nustatymo rodikliai: grynoji dabartinė vertė (GDV) ir vidinė gražos norma (VGN).

GDV ir VGN dydžiai yra apskaičiuojami remiantis diskontuotais pinigų srautais, taikant palūkanų normą, kuri dažniausiai prilyginama rinkos palūkanų normai. Skaičiuojant jėgainės ekonominį efektyvumą, priimama diskonto norma – 0,06 (6 %) [48].

GDV apskaičiuojama pagal formulę:

$$GDV = PS_0 + PS_1/(1+i)^1 + PS_2/(1+i)^2 + \dots + PS_n/(1+i)^n. \quad (50)$$

čia PS_0 – pradinė investicija, Eur; PS_n – pinigų srautas konkrečiais metais, Eur; i – diskonto norma, išreikšta procento dalimis; n – konkretūs investavimo metai.

Jei apskaičiuota GDV vertė yra didesnė nei 0, projektas – efektyvus ir tinkamas įgyvendinti, jei lygi – svarstytinas, tačiau dažniausiai – netinkamas, jei mažesnė – neefektyvus ir netinkamas.

Tuo tarpu, vidinė gražos norma (VGN rodiklis) – tai finansinis rodiklis, kuris naudojamas projektų atsipirkimui ar patrauklumui/pelningumui vertinti. Šis rodiklis įvertina metinį geometrinį investicijos atsipirkimo gražos vidurkį per tam tikrą laikotarpį, atsižvelgiant į išlaidas bei gaunamas pajamas [49].

VGN apskaičiuojama pagal formulę:

$$O = \sum_{n=0}^N \frac{PS_n}{(1+VGN)^n}. \quad (51)$$

čia N – visos investicijos laikotarpis metais.

Pagal VGN, taip pat galima spręsti ar projektas tinkamas įgyvendinti, šis vertinimas priklauso nuo diskonto normos, jeigu VGN yra didesnė už diskonto normą – projektas tinkamas įgyvendinti, jei mažesnė – netinkamas.

Kitas projekto efektyvumo vertinimo kriterijus – paprastasis atsipirkimo laikas. Šį rodiklį nustatome pasinaudodami formule:

$$PAL = \frac{I}{S}. \quad (52)$$

čia I – planuojamos investicijos, Eur; S – planuojami metiniai sutaupymai, Eur/metus.

Planuojamos investicijos biomasės dujinimo jėgainei įsigyti tikrasis atsipirkimo laikas skaičiuojamas pagal formulę:

$$TAL = \frac{-\ln\left(1 - i \times \frac{I_0}{\Delta S}\right)}{\ln(1+i)}. \quad (53)$$

čia I_0 – investicijų dydis pirmaisiais metais, Eur; ΔS – kasmetiniai sutaupymai dėl iš tinklų neperkamos šilumos ir elektros energijos, pirmųjų metų pinigų suma, Eur/metus;

Toliau esančiose 12 ir 13 lentelėse yra pateikiami Excel programoje atlikto jėgainės ekonominio skaičiavimo rezultatai.

12 lentelė. Jėgainės projekto finansinis balansas

Projekto metai	Numatoma investicija į biomasės dujinimo jėgainę, Eur	Sutaupymai dėl iš tinklų neperkamos elektros energijos, Eur	Sutaupymai dėl nenupirkto šiluminės energijos, Eur	Jėgainės eksploatacinės išlaidos, Eur	Projekto pinigų srautai, Eur	Projekto balansas, Eur
0	107 000	-	-	-	-107 000	-107 000
1	-	33 913	18 000	29 263	22 650	-84 350
2	-	33 913	18 000	29 263	22 650	-61 700
3	-	33 913	18 000	29 263	22 650	-39 050
4	-	33 913	18 000	29 263	22 650	-16 400
5	-	33 913	18 000	29 263	22 650	6 250
6	-	33 913	18 000	29 263	22 650	28 900
7	-	33 913	18 000	29 263	22 650	51 550
8	-	33 913	18 000	29 263	22 650	74 200
9	-	33 913	18 000	29 263	22 650	96 850
10	-	33 913	18 000	29 263	22 650	119 500
11	-	33 913	18 000	29 263	22 650	142 150

12 lentelė. (tęsinys)

12	-	33 913	18 000	29 263	22 650	164 800
13	-	33 913	18 000	29 263	22 650	187 450
14	-	33 913	18 000	29 263	22 650	210 100
15	-	33 913	18 000	29 263	22 650	232 750
16	-	33 913	18 000	29 263	22 650	255 400
17	-	33 913	18 000	29 263	22 650	278 050
18	-	33 913	18 000	29 263	22 650	300 700
19	-	33 913	18 000	29 263	22 650	323 350
20	-	33 913	18 000	29 263	22 650	346 000
21	-	33 913	18 000	29 263	22 650	368 650
22	-	33 913	18 000	29 263	22 650	391 300
23	-	33 913	18 000	29 263	22 650	413 950
24	-	33 913	18 000	29 263	22 650	436 600
25	-	33 913	18 000	29 263	22 650	459 250

13 lentelė. Jėgainės projekto PAL, TAL, VGN ir GDV parametrai

Parametras	Vertė	Matavimo vienetai
Vidinė gražos norma	21	%
Grynoji dabartinė vertė (su 6 proc. diskonto norma)	172 210	Eur
Paprastasis atsipirkimo laikas	4,72	metų
Tikrasis atsipirkimo laikas	5,72	metų

Kaip matome jėgainės tikrasis atsipirkimo laikas 5,72 metų. Gauta GDV vertė – 172 210 Eur, verčia teigti, jog projektas efektyvus ir tinkamas įgyvendinimui, projekto įgyvendinimo tinkamumą indikuoja ir VGN vertė – 21 %, kai diskonto norma – 6 %. Visi trys apskaičiuoti parametrai rodo aukštą projekto ekonominį potencialą.

Žinoma, norint didesnio objektyvumo reikėtų papildomai įvertinti įrangos gedimus ir dėvėjimąsi, kurie gali paveikti projekto ekonominį patrauklumą, nes sumažėtų energijos gamybos efektyvumas, padidėtų kuro sąnaudos, ar net sutrumpėtų maksimalus įrangos eksploatavimo laikas.

Reikia atkreipti dėmesį ir į potencialius elektros, šilumos bei biokuro kainų svyravimus, kurie gali atsirasti per nagrinėjamus 25 metus. Žinant, jog Lietuva 2025 metais siekia pabaigti sinchronizacijos su kontinentinės Europos elektros tinklais projektą [50] ir išeiti iš BRELL (Baltarusijos, Rusijos šiaurės vakarų ir Estijos, Latvijos bei Lietuvos energetinis žiedas) sutarties, galimi elektros energijos kainų svyravimai, kurie paveiktų projekto efektyvumą ir atsipirkimo laiką. Tuo tarpu, biokuro kainų kitimas, per ateinančius 25 metus, taip pat yra galimas, kadangi, netolimoje ateityje yra prognozuojama, jog augs prastesnės kondicijos kuro kiekiai, kurio tiesioginis deginimas nebus toks tikslingas, taip pat yra vertintina ir importuojamo kuro kainų įtaka bei visos biokuro rinkos konkurencinė situacija Lietuvoje ir rytų Europos regione. Biokuro kaina paveiktų ir centralizuotai parduodamos šilumos energijos kainas. Visi veiksniai lemtų nagrinėjamo projekto naudingumą.

Projekto efektyvumą veikia ir diskonto norma bei paramos intensyvumas. Norint įvertinti išvardintų veiksnių įtaką projekto efektyvumui yra atliekama jautrumo analizė.

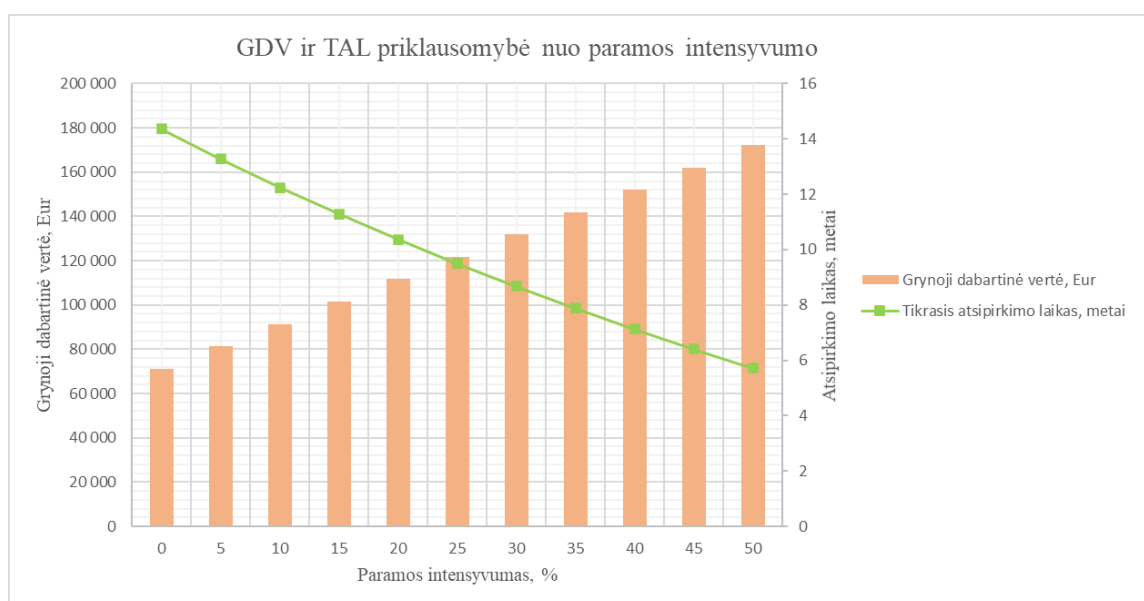
3.7. Jėgainės projekto jautrumo analizė

Jautrumo analizė padeda išnagrinėti, kokią įtaką projekto grynajai dabartinė vertei, vidinei gražos normai, atsipirkimo laikui ir bendram projekto efektyvumui daro diskonto normos, paramos intensyvumo, elektros ir biokuro kainų kitimas.

Visų pirma, varijuojame projektui suteikiamos paramos dydžiu nuo 0 % iki 50 %. Toliau esančioje 14 lentelėje yra pateikiamos apskaičiuotos grynosios dabartinė vertės, vidinės pelno normos ir paprastojo bei tikrojo atsipirkimo laiko vertės. O 19 pav. yra pavaizduota TAL ir GDV kitimo diagrama.

14 lentelė. Jautrumo analizės rezultatai keičiant paramos intensyvumą

Paramos intensyvumas, %	Numatoma investicija į biomasės dujinimo jėgainę atėmus paramą, Eur	Vidinė gražos norma, %	Grynoji dabartinė vertė (su 6 proc. diskonto norma), Eur	Paprastasis atsipirkimo laikas, metai	Tikrasis atsipirkimo laikas, metai
0	214 000	9,5	71 267	9,45	14,36
5	203 300	10,1	81 361	8,98	13,27
10	192 600	10,9	91 456	8,5	12,25
15	181 900	11,7	101 550	8,03	11,28
20	171 200	12,5	111 644	7,56	10,37
25	160 500	13,5	121 739	7,09	9,5
30	149 800	14,6	131 833	6,61	8,68
35	139 100	15,9	141 927	6,14	7,89
40	128 400	17,3	152 022	5,67	7,13
45	117 700	19	162 116	5,2	6,41
50	107 000	21	172 100	4,72	5,72



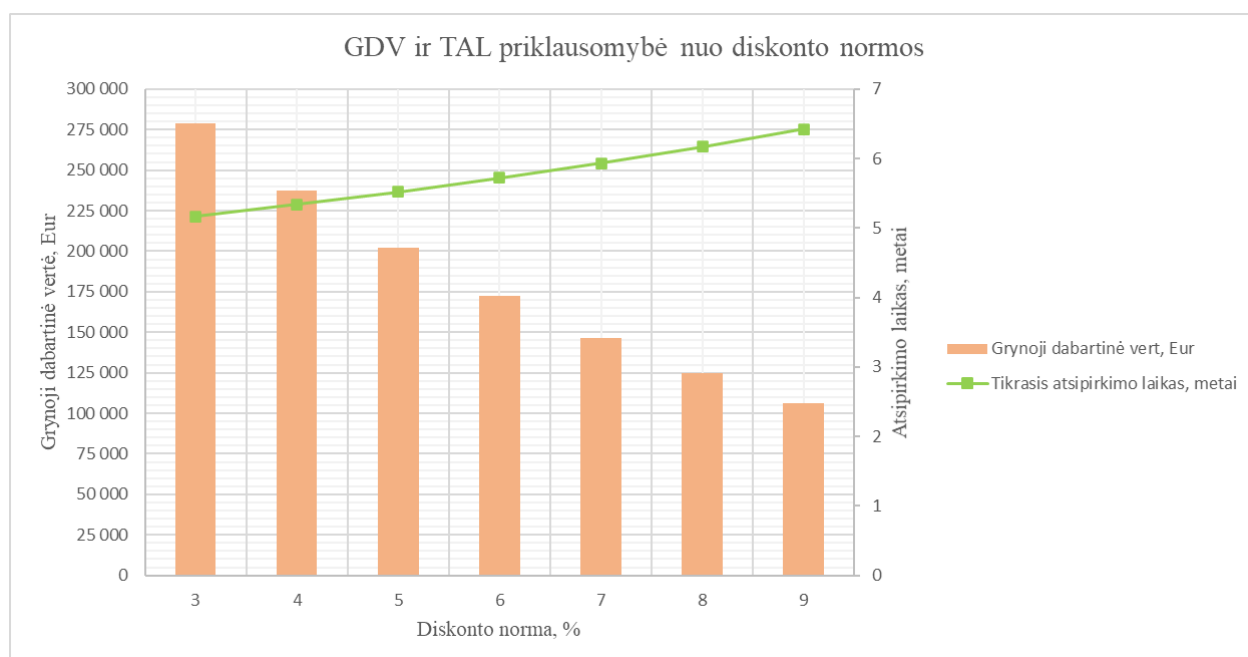
19 pav. GDV ir TAL priklausomybė nuo paramos intensyvumo

Matome, jog paramos intensyvumui keičiantis nuo 0 % iki 50 %, TAL trumpėja nuo ~14,4 iki ~5,7 metų, o grynoji dabartinė vertė auga nuo 71 267 iki 172 100 eurų. Apskaičiuoti parametrai rodo, jog esant mažai paramai (0 – 20 %), projekto įgyvendinimas tampa nepatraukliu dėl ilgo atsipirkimo laiko. Kadangi nacionalinės arba europinės paramos šiuo metu galima tikėtis, potencialus projekto naudingumas turėtų skatinti jį įgyvendinti.

Kitas etapas – keičiant diskonto normą analizuosime kaip kinta GDV ir TAL parametrai. Toliau esančioje 15 lentelėje yra pateikiamos apskaičiuotos vertės, o 20 pav. yra pavaizduota jų kitimo diagrama.

15 lentelė. Jautrumo analizės rezultatai keičiant diskonto normą

Diskonto norma, %	Grynoji dabartinė vertė, Eur	Tikrasis atsipirkimo laikas, metai
3	279 037	5,17
4	237 346	5,34
5	202 122	5,52
6	172 210	5,72
7	146 686	5,93
8	124 800	6,17
9	105 946	6,42



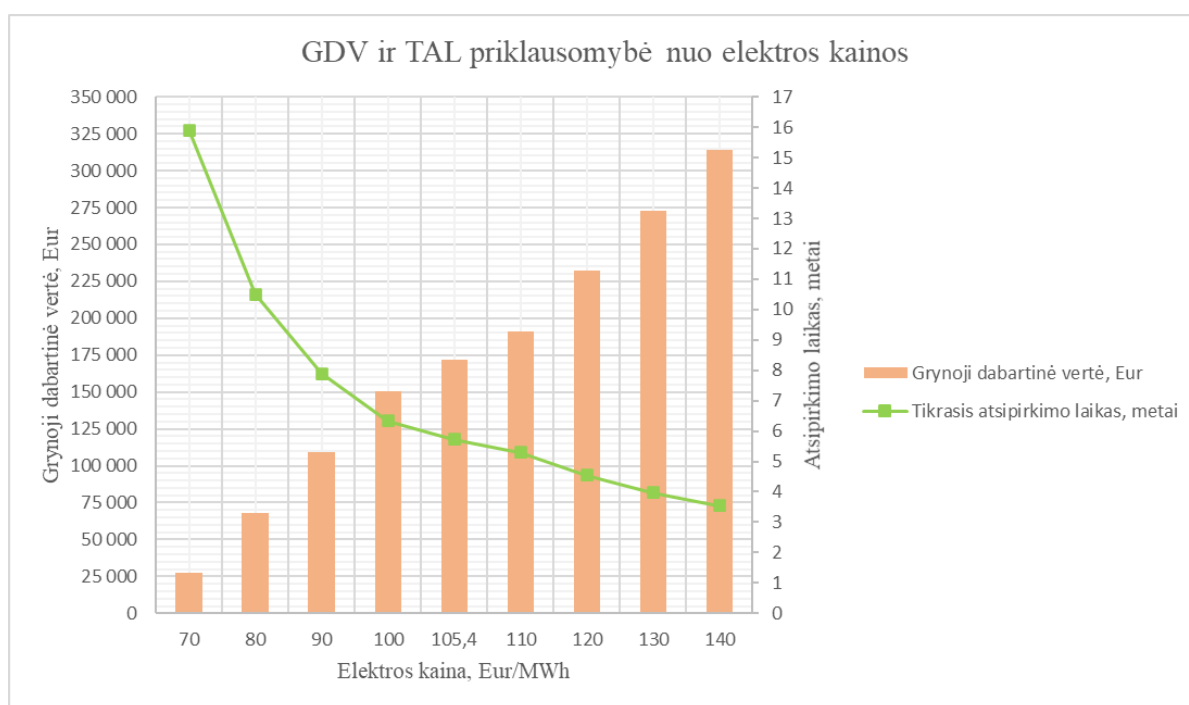
20 pav. GDV ir TAL priklausomybė nuo diskonto normos

Skaičiavimo rezultatai rodo, jog diskonto normai keičiantis nuo 3 % iki 9 %, TAL ilgėja nuo ~5,2 iki ~6,4 metų, o grynoji dabartinė vertė mažėja nuo 279 037 iki 105 946 eurų. Taigi, kuomet žemesnė diskonto norma, tuo rentablesniu ir naudingesniu projektas tampa ir atvirkščiai, parametrai didėjant, projektas darosi mažiau vertingas. Tačiau, galima teigti, jog nagrinėjamame parametro kitimo diapazone projektas išlieka tinkama investicija.

Trečiojoje analizėje varijuojame elektros kainą nuo 70 iki 140 Eur/MWh ir stebime kaip kinta finansiniai parametrai (16 lentelė ir 21 pav.).

16 lentelė. Jautrumo analizės rezultatai keičiant elektros kainą

Elektros kaina, Eur/MWh	Metiniai sutaupymai dėl to, jog elektros energija yra neperkama iš tinklų, Eur/metai	Vidinė gražos norma, %	Grynoji dabartinė vertė (su 6 proc. diskonto norma), Eur	Paprastasis atsipirkimo laikas, metai	Tikrasis atsipirkimo laikas, metai
70	21 893	8,7	27 252	10,07	15,9
80	25 290	12,4	68 219	7,63	10,5
90	28 686	15,9	109 174	6,14	7,89
100	32 082	19,2	150 129	5,14	6,33
105,4	33 913	21	172 210	4,72	5,72
110	35 478	22,5	191 084	4,42	5,29
120	38 874	25,7	232 039	3,88	4,54
130	42 270	28,9	272 994	3,45	3,98
140	45 666	32,1	313 949	3,11	3,54



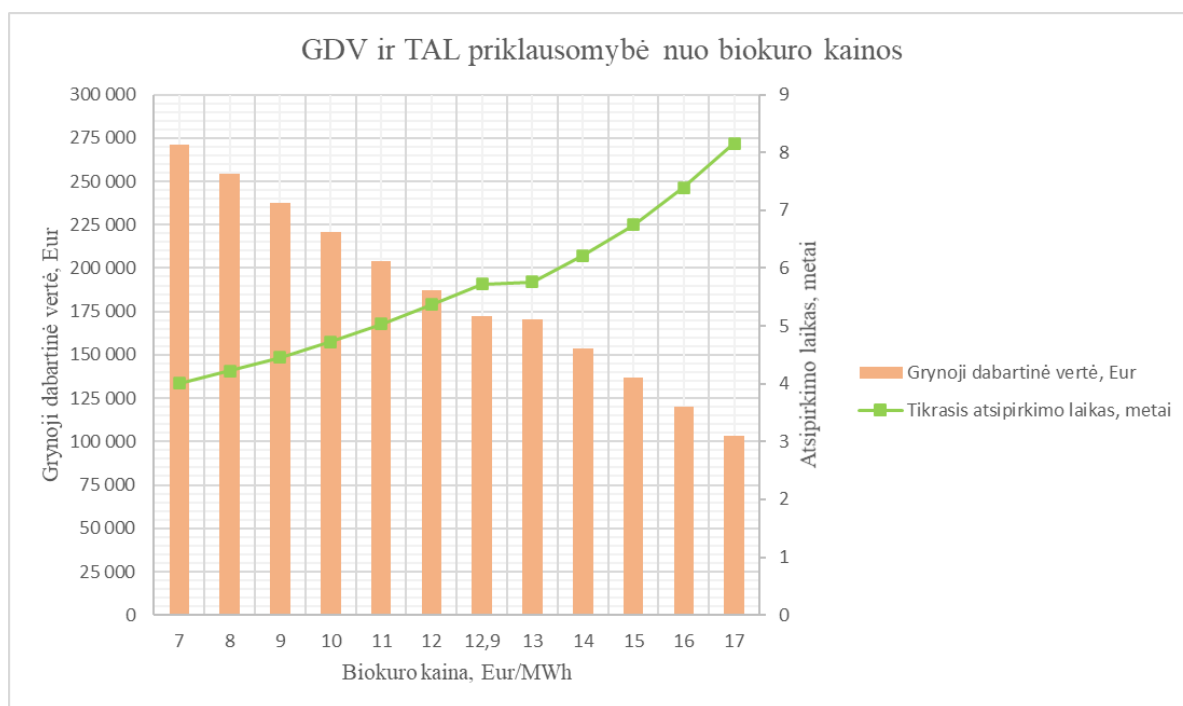
21 pav. GDV ir TAL priklausomybė nuo elektros kainos

21 pav. matome, jog elektros kainai keičiantis nuo 70 iki 140 Eur/MWh, TAL trumpėja nuo ~16 iki ~3,5 metų, o grynoji dabartinė vertė didėja nuo 27 252 iki 313 949 eurų. Taigi, kuo žemesnė elektros kaina, tuo mažiau naudingas projektas tampa ir atvirkščiai, parametru didėjant, projekto efektyvumas auga. Galima daryti išvadą, kad elektros kainai esant 70 Eur/MWh, o ypač 80 Eur/MWh, investicija tampa nepatrauklia dėl ilgo atsipirkimo laiko.

Ketvirtame etape keičiame biokuro kainą nuo 7 iki 17 Eur/MWh ir stebime finansinių parametru kitimą. (17 lentelė ir 22 pav.).

17 lentelė. Jautrumo analizės rezultatai keičiant biokuro kainą

Biokuro kaina, Eur/MWh	Metinės išlaidos biokurui įsigyti, Eur/metai	Vidinė gražos norma, %	Grynoji dabartinė vertė (su 6 proc. diskonto norma), Eur	Paprastasis atsipirkimo laikas, metai	Tikrasis atsipirkimo laikas, metai
7	9 715	28,8	270 956	3,47	4,01
8	11 103	27,5	254 217	3,63	4,22
9	12 491	26,1	237 478	3,81	4,46
10	13 879	24,8	220 739	4,01	4,73
11	15 266	23,5	204 012	4,23	5,03
12	16 654	22,2	187 273	4,48	5,37
12,9	17 903	21	172 210	4,72	5,72
13	18 042	20,9	170 534	4,75	5,76
14	19 430	19,5	153 795	5,07	6,22
15	20 818	18,2	137 056	5,42	6,75
16	22 206	16,8	120 317	5,83	7,39
17	23 594	15,4	103 578	6,31	8,16



22 pav. GDV ir TAL priklausomybė nuo biokuro kainos

Galima pastebėti, jog biokuro kainai keičiantis nuo 7 iki 17 Eur/MWh, TAL ilgėja nuo ~4 iki ~8,2 metų, o grynoji dabartinė vertė mažėja nuo 270 956 iki 103 578 eurų. Taigi, kuo žemesnė biokuro kaina, tuo naudingesniu projektas tampa ir atvirkščiai, parametrai didėjant, projekto efektyvumas mažėja. Tačiau, verta pabrėžti, kad biokuro kainos kitimas turi mažesnę įtaką projekto ekonominiam vertingumui nei elektros kaina. Nagrinėjamame parametro kitimo diapazone projektas išlieka tinkama investicija.

Atlikta jautrumo analizė atskleidė, jog vienam iš veiksnių bloginant projekto efektyvumą, jėgainės investicija išlieka priimtina. Žinoma, šis tyrimo metodas neleidžia išnagrinėti ekonominio projekto efektyvumo kompleksiškai, kadangi analizės metu keičiama tik vieno parametro vertė, kai kitos išlieka pastovios. Galima nesunkiai numatyti, jog pesimistinio scenarijaus atveju, kuomet paramos intensyvumas būtų lygus 0 %, diskonto norma – 9 %, elektros kaina – 70 Eur/MWh, o biokuro kaina – 17 Eur/MWh, projektas taptų ekonomiškai nenaudingas. O paramos intensyvumui esant 50 %, diskonto normai – 3 %, elektros kainai – 140 Eur/MWh, o biokuro kainai – 7 Eur/MWh, projektas būtų itin greitai atsiperkantis.

Apibendrinant galima pastebėti, kad ši įranga yra racionalus pasirinkimas įmonėms, kurios turi nuosavo atliekinio kuro (pavyzdžiui, medienos apdirbimo įmonės), tai leidžia daugiau nei perpus sumažinti eksploatacines išlaidas ir pasiekti itin palankių ekonominių rodiklių. Apskaičiuoti parametrai, taip pat indikuoja apie biomasės dujinimo jėgainės arba lygiagrečiai sujungtų agregatų bloko galimybes būti komercinės energijos gamybos pagrindu.

Išvados

1. Biomasės dujinimo pagrindinės proceso reakcijos – Boudouard, anglies dujinimo, vandens garų konversijos ir metano susidarymo. Dujinimo proceso metu pagaminamos sintezės dujos yra dujų mišinys sudarytas iš CO₂ (anglies dioksido), H₂O (vandens garo), CO (anglies monoksido), H₂ (vandenilio), CH₄ (metano), taip pat, mažų aukštesnės kategorijos angliavandenilių kiekių bei priemaišų, tokių kaip anglies dalelės, dervos, pelenai, azoto ir sieros junginiai, šarminiai metalai, chloridai ir kitos.
2. Darbe išanalizuotos dujinimo technologijos. Praktikoje dažniausiai naudojami dujinimo įrenginiai: stacionaraus sluoksnio aukštyje judančio srauto (šiluminės galios diapazonas: 1 – 10 MW; pasižymi paprastumu ir galimybe panaudoti itin drėgną kurą (<60 %)), stacionaraus sluoksnio žemyn judančio srauto (šiluminės galios diapazonas: 10 kW – 1 MW; gamina sintetines dujas su mažu dervų kiekiu (0,015–3 g/Nm³)), burbuliuojančio verdančio sluoksnio ir cirkuliuojančio verdančio sluoksnio (šiluminės galios diapazonas: 1 – 100 MW; pasižymi tolygia dujų išėiga ir vienodu temperatūros pasiskirstymu visame reaktoriuje);
3. Pasinaudojant termodinaminės pusiausvyros modelio skaičiuokle, atliktas sintezės dujų komponentų kitimo tyrimas, parodė, jog augant biokuro (nagrinėtu atveju mišrių medienos skiedrų) drėgmės kiekiui (nuo 0 % iki 25 %) arba dujinimo temperatūrai (nuo 700 °C iki 1100 °C) – degių komponentų koncentracijos (CO, H₂, CH₄) daugeliu atvejų mažėja, dėl to krenta ir sintezės dujų apatinė šiluminė vertė: skiedros drėgmės kitimo atveju: nuo 4,22 MJ/Nm³ iki 3,24 MJ/Nm³, o temperatūros kitimo atveju: nuo 4,67 MJ/Nm³ iki 3,38 MJ/Nm³;
4. Naudojant biomasės dujinimo mikro–kogeneracinę jėgainę yra dalinai patenkinami nagrinėtos įmonės energijos poreikiai;
5. Atlikus biomasės dujinimo mikro–kogeneracinės jėgainės projekto ekonominius skaičiavimus, gauti rezultatai: VGN – 21 % (diskonto norma – 6 %), GDV – 172 210 Eur, TAL – 5,72 metų, rodo, kad nagrinėta investicija yra rentabili;
6. Atlikta jėgainės įrengimo ir eksploatavimo jautrumo analizė, kurios metu buvo keičiamas paramos intensyvumas (nuo 0 % iki 50 %), diskonto norma (nuo 3 % iki 9 %), elektros (nuo 70 Eur/MWh iki 140 Eur/MWh) ir biokuro (nuo 7 Eur/MWh iki 17 Eur/MWh) kainos, parodė, jog vienam iš parametrų bloginant projekto efektyvumą, daugeliu atveju investicija išlieka priimtina.

Literatūros sąrašas

1. LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTERIJA. *Lietuvos Respublikos ministro įsakymas dėl pramoninių ir komunalinių atliekų biologiškai skaidžios dalies atskyrimo, atsižvelgiant į energijos, pagamintos iš pramoninių ir komunalinių atliekų, atsinaujinančią dalį, metodikos patvirtinimo* [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-04-01]. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.434728/yEYZYLPKvY>.
2. NAVICKAS, K., VENSLAUSKAS, K. *Biomassės būvio ciklo analizė: mokomoji knyga* [interaktyvus]. Akademija, 2012. [žiūrėta 2021-04-01]. Prieiga per: http://www.esparama.lt/es_parama_pletra/failai/ESFproduktai/2012_Biomases_buvio_ciklo_analize_mokomoji_knyga.pdf.
3. RAMANAUSKAS Virginijus. *Biomassės energetikos plėtra Lietuvoje*. [interaktyvus]. 2014 [žiūrėta 2021-04-02]. Prieiga per: https://www.lsta.lt/files/events/2014-11-04_05_Litbiomos%20konf/Bendroji%20dalis_pranesimai/1.Virginijus%20Ramanauskas%20LTBIOMA%20final.pdf.
4. Lietuvos aplinka, žemės ūkis ir energetika (2020 m. leidimas) [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2021-04-02 d.]. Prieiga per: <https://osp.stat.gov.lt/lietuvos-aplinka-zemes-ukis-ir-energetika-2020/energetika/atsinaujinantys-energijos-istekliai>.
5. LIETUVOS RESPUBLIKOS SEIMAS. *Nutarimas dėl nacionalinės energetinės nepriklausomybės strategijos patvirtinimo: 2012 m. birželio 26 d. Nr. XI-2133* [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-04-02]. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.429490/asr>.
6. HIGMAN, Christopher, Marteen VAN DER BURGT. *Gasification* [interaktyvus]. 1-oji laida. New York: Elsevier Science, 2003 [žiūrėta 2021-04-08]. ISBN 9780080477992. Prieiga per: <https://books.google.lt/books?id=ZUIRaUrX8IUC&printsec=frontcover&hl=lt#v=onepage&q&f=false>.
7. BASU, P. *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*. 1-oji laida. Academic Press, 2010. ISBN 9780080961620.
8. DEMIRBAŞ, Ayhan. Hydrogen Production from Biomass by the Gasification Process. *Energy Sources* [interaktyvus]. 2002, **24**(1), 59-68. [žiūrėta 2021-04-08]. Prieiga per: doi: [10.1080/00908310252712307](https://doi.org/10.1080/00908310252712307).
9. *Visuotinė lietuvių enciklopedija: pirolizė* [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-04-08]. Prieiga per: <https://www.vle.lt/straipsnis/pirolize/>.
10. ROOS, Carolyn J., et al. *Clean heat and power using biomass gasification for industrial and agricultural projects* [interaktyvus]. Northwest CHP Application Center, 2010 [žiūrėta 2021-04-09]. Prieiga per: <https://digitalarchives.wa.gov/do/493d8e490fa92471061f3099709e9628.pdf>.
11. NEUWAHL, Frederik, et al. *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration: Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control)* [interaktyvus]. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019 [žiūrėta 2021-04-10]. Prieiga per: doi: [10.2760/761437_JRC118637](https://doi.org/10.2760/761437_JRC118637).
12. DEMIRBAŞ, Ayhan. *Biorefineries: For Biomass Upgrading Facilities* [interaktyvus]. Springer, London, 2010 [žiūrėta 2020-04-11]. ISBN 978-1-84882-721-9. Prieiga per: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-1-84882-721-9.pdf>.

13. SHEN, Dekui, et.al. The pyrolytic behavior of cellulose in lignocellulosic biomass: a review. *RSC Advances* [interaktyvus]. 2011, **1**, 1641–1660 [žiūrėta 2020-04-11]. Prieiga per: doi: [10.1039/C1RA00534K](https://doi.org/10.1039/C1RA00534K).
14. RAGELIENĖ, Lina, Donatas MICKEVIČIUS. *Fizikinė chemija: praktiniai darbai* [interaktyvus]. Kaunas, 2011 [žiūrėta 2020-04-11]. ISBN 9789955127512. Prieiga per: <https://www.vdu.lt/cris/bitstream/20.500.12259/202/1/ISBN9789955127512.pdf>.
15. KNOEF, H. A. M. (Ed.). *Handbook Biomass Gasification*. 1–oji laida. 2005. ISBN 9081938509.
16. MCKENDRY, Peter. Energy production from biomass (part 3): gasification technologies. *Bioresource Technology* [interaktyvus]. 2002, **83**(1), 55–63 [žiūrėta 2020-04-11]. Prieiga per: doi: [10.1016/S0960-8524\(01\)00120-1](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00120-1).
17. CIFERNO, Jared P., John J. MARANO. *Benchmarking Biomass Gasification Technologies for Fuels, Chemicals and Hydrogen Production* [interaktyvus]. U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory, 2002 [žiūrėta 2021-04-11]. Prieiga per: https://netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/BMassGasFinal_0.pdf.
18. FRANK, Sebastián. *Downdraft gasifier modeling* [interaktyvus]. EAFIT University, 2016 [žiūrėta 2021-04-09]. Prieiga per: https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/12352/ComasGil_FrankSebastian_2016.pdf;jsessionid=6CAFDC953498CA5B7B991B9118E118BF?sequence=2.
19. MBIKAN, Atainu. *Mathematical modelling of a small biomass gasifier for synthesis gas production* [interaktyvus]. Northumbria University, 2019. [žiūrėta 2021-04-09]. Prieiga per: http://nrl.northumbria.ac.uk/id/eprint/42812/1/mbikan.atainu_phd.pdf
20. ZAINAL, Z.A., et.al. Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials. *Energy Conversion and Management* [interaktyvus]. 2001, **42**, 1499–1515 [žiūrėta 2021-04-11]. Prieiga per: doi: [10.1016/S0196-8904\(00\)00078-9](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00078-9)
21. JARUNGTHAMMACHOTE S., A. DUTTA. Thermodynamic equilibrium model and second law analysis of a downdraft waste gasifier. *Energy* [interaktyvus]. 2007, **32**, 1660–1669 [žiūrėta 2021-04-11]. Prieiga per: doi: [10.1016/S0196-8904\(00\)00078-9](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00078-9).
22. MELGAR, A., et.al. Thermochemical equilibrium modeling of a gasifying process. *Energy Conversion and Management* [interaktyvus]. 2007, **48**, 59–67 [žiūrėta 2021-04-11]. Prieiga per: doi: [101016/jenconman200605004](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.05.004).
23. PUIG ARNAVAT, M. *Performance modelling and validation of biomass gasifiers for trigeneration plant* [interaktyvus]. Rovira i Virgili University, 2011. [žiūrėta 2021-04-09]. Prieiga per: <https://cupdf.com/document/phd-thesis-m-puig.html>.
24. GAUTAM, G. Parametric Study of a Commercial-Scale Biomass Downdraft Gasifier: Experiments and Equilibrium Modeling [interaktyvus]. Auburn University, 2010 [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per: <https://etd.auburn.edu/bitstream/handle/10415/2305/final%20corrected%20thesis.pdf.txt?sequence=3&isAllowed=y>.
25. STRIŪGAS, Nerijus, et.al. An evaluation of performance of automatically operated multi-fuel downdraft gasifier for energy production. *Applied Thermal Engineering* [interaktyvus]. 2014, **73**, 1151–1159 [žiūrėta 2021-04-12]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.09.007>.

26. STRIŪGAS, Nerijus, et.al. Biomės ir atliekų dujinimo tyrimai Lietuvoje: esama būklė ir ateities perspektyvos. *Energetika* [interaktyvus]. 2016, **64**(4) [žiūrėta 2021-04-12]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.6001/energetika.v62i4.3396>.
27. IRENA working paper: Biomass for power generation [interaktyvus]. 2012 [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2012/RE Technologies Cost Analysis-BIOMASS.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2012/RE_Technologies_Cost_Analysis-BIOMASS.pdf).
28. *Magazine: Cogeneration and On-site Power Production, Ltd., Penwell International*.
29. Danish Energy Agency: Technology Data for Energy Plants for Electricity and District heating generation [interaktyvus]. 2016 [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per: <https://refman.energytransitionmodel.com>download>.
30. MARTINEZ, Simon, et. al. Micro-combined heat and power systems (micro-CHP) based on renewable energy sources. *Energy Conversion and Management* [interaktyvus]. 2017, **154**, 262–285 [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per: doi: [10.1016/j.enconman.2017.10.035](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.10.035).
31. MOLINO, Antonio, et. al. Biomass gasification technology: The state of the art overview. *Journal of Energy Chemistry* [interaktyvus]. 2016, **25**(1), 10–25 [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per: doi: [10.1016/j.jechem.2015.11.005](https://doi.org/10.1016/j.jechem.2015.11.005).
32. YASSIN Liban, et. al. Techno-economic performance of energy-from-waste fluidized bed combustion and gasification processes in the UK context. *Chemical Engineering Journal* [interaktyvus]. 2009, **146**(3), 315–327 [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per: doi: [10.1016/j.cej.2008.06.014](https://doi.org/10.1016/j.cej.2008.06.014).
33. MILNE, T.A., et al. *Biomass Gasifier “Tars”: Their Nature, Formation, and Conversion* [interaktyvus]. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO (US), 1998 [žiūrėta 2021-04-09]. Prieiga per: <https://digitalarchives.wa.gov/do/493d8e490fa92471061f3099709e9628.pdf>.
34. BALAS, Marek, et al. Syngas cleaning by wet scrubber. *WSEAS Transactions on Heat and Mass Transfer* [interaktyvus]. 2014, **9**(1), 195–204 [žiūrėta 2021-04-10]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/286501190_Syngas_cleaning_by_wet_scrubber.
35. EUROPOS PARLAMENTAS IR KOMISIJA. *Directive 2004/8/EC on the promotion of cogeneration based on a useful heat demand in the internal energy market and amending Directive 92/42/EEC (11 February 2004)* [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:052:0050:0060:EN:PDF>.
36. EUROPOS KOMISIJA. *KOMISIJOS KOMUNIKATAS: Europos žaliasis kursas* [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?qid=1576150542719&uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN>.
37. LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTERIJA. *Dėl statybos techninio reglamento STR 2.01.02:2016 „Pastatų energinio naudingumo projektavimas ir sertifikavimas“ patvirtinimo* [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/15767120a80711e68987e8320e9a5185>.
38. *Spanner Re² GmbH* [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-05-09]. Prieiga per: <https://www.holz-kraft.com/en/>.
39. Biomės dujinimo jėgainės (49 kW_e) įrangos aprašymas (gamintojas – Spanner Re² GmbH).
40. *ESO: Gaminančių vartotojų atsiskaitymo būdai* [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per: <https://www.eso.lt/lt/namams/elektra/tarifai-kainos-atsiskaitymas-ir-skolos/gaminanciu-vartotoju-kainos.html>.

41. *Electricity prices by type of user* [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per: <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ten00117/default/table?lang=en>.
42. *2014-2020 metų Europos Sąjungos fondų investicijų veiksmų programa: Paraiškos ir projektai* [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per: https://www.esinvesticijos.lt/lt/finansavimas/paraiskos_ir_projektai.
43. *APVA: atsinaujinančių energijos išteklių (saulės, vėjo, geoterminės energijos, biokuro ar kitų) panaudojimas privačių juridinių asmenų visuomeninės, gamybinės paskirties pastatuose, kitos paskirties inžineriniuose statiniuose (sąvartynuose, nuotekų valyklų statiniuose), pakeičiant iškastinio kuro naudojimą* [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per: <https://www.apva.lt/atsinaujinanciu-energijos-istekliu-saules-vejo-geotermines-energijos-biokuro-ar-kitu-panaudojimas-privaciu-juridiniu-asmenu-visuomenines-gamybines-paskirties-pastatuose-kitos-paskirties-inziner/>.
44. CICHY, Wojciech, et. al. Fuel Properties of Woody Biomass from Pruning Operations in Fruit Orchards. *BioResources* [interaktyvus]. 2017, **12**(3), 6458-6470 [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per: doi: [10.15376/biores.12.3.6458-6470](https://doi.org/10.15376/biores.12.3.6458-6470).
45. *BALTPOOL: biržoje prekiaujami produktai* [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-04-01]. Prieiga per: <https://www.baltpool.eu/lt/birzoje-prekiaujami-produktai/>.
46. *BALTPOOL: biokuro biržos apžvalga 2020 m.* [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-04-01]. Prieiga per: <https://www.baltpool.eu/dl/2021~01~2020-12-m.-biokuro-birzos-apzvalga-final.pdf/2020-12-m.-biokuro-birzos-apzvalga-final.pdf/2020-12%20m.%20biokuro%20birzos%20apzvalga%20final>.
47. *VERT: šilumos kainų statistika Lietuvoje* [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per: <https://www.regula.lt/Puslapiai/naujienos/2021-metai/2021-balandis/2021-04-12/balandzio-menesio-silumos-kainu-statistika-Lietuvoje.aspx>.
48. *GrandThorton: Renewable energy discount rate survey results* [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per: <https://www.grantthornton.co.uk/globalassets/1.-member-firms/united-kingdom/pdf/documents/renewable-energy-discount-rate-survey-results-2018.pdf>.
49. *Vidinė grąžos norma (IRR)* [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per: <https://www.finansistas.net/vidine-grazos-norma.html>.
50. *Sinchronizacija su kontinentine Europa* [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per: <https://enmin.lrv.lt/lt/veiklos-sritis-3/elektra/sinchronizacija-su-kontinentine-europa>.

Priedai

1 priedas. Biomasės dujinimo produktų skaičiuoklė (Matlab) [24]

```
function[Galutine_sudetis]=Dujofikacija(d_temp,ele_sudetis)
format short
tol=0.0001;
maxit=100;
disp('Elementinė kompozicija turi būti pateikta forma [C, H, O, N, Pelenai]');
ele_sudetis=input('Įvesti elementinę biomasės kompoziciją: ');
disp('Pirminio spėjimo forma [H2 CO CO2 H2O CH4 3.76N2] ');
xx0=[0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1]';
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Skirtingų junginių susidarymo entalpija, kai temperatūra 25 C, kJ/kmol
H_f_H2O_g=-241818;H_f_H2O_l=-285830;H_f_CO2=-393509;H_f_CO=-110525;
H_f_CH4=-74520;H_f_H2=0;H_f_O2=0;H_f_N2=0;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Funkcija rasti savitąją šilumą įvairioms dujoms
C_p_H2O=[32.24 0.1923e-2 1.055e-5 -3.595e-9];
C_p_H2=[29.11 -0.1916e-2 0.4003e-5 -0.8704e-9];
C_p_CO=[28.16 0.1675e-2 0.5372e-5 -2.222e-9];
C_p_CO2=[22.26 5.981e-2 -3.501e-5 -7.469e-9];
C_p_CH4=[19.89 5.204e-2 1.269e-5 -11.01e-9];
C_p_N2=[28.90 -0.1571e-2 0.8081e-5 -2.873e-9];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%k1 ir k2 skaičiavimas
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
G_CO=[3.376 0.557e-3 0 -0.031e5 -110525 -137169];
G_CO2=[5.457 1.045e-3 0 -1.157e5 -393509 -394359];
G_H2O=[3.470 1.450e-3 0 0.121e5 -241818 -228572];
G_H2=[3.249 0.422e-3 0 0.083e5 0 0];
G_C=[1.771 0.771e-3 0 -0.867e5 0 0];
G_CH4=[1.702 9.081e-3 -2.164e-6 0 -74520 -50460];
delta_vg=[];
delta_meta=[];
for iii=1:6
delta_vgp=G_H2(iii)+G_CO2(iii)-G_CO(iii)-G_H2O(iii);
delta_met=G_CH4(iii)-G_C(iii)-2*G_H2(iii);
delta_vg=[delta_vg delta_vgp];
delta_meta=[delta_meta delta_met];
end
T_0=298;
d_temp=1073;
k1=exp(-((delta_meta(6)-
delta_meta(5))/(8.314*298.15)+(delta_meta(5)/(8.314*d_temp))...
+(int_lyg2(delta_meta,d_temp)/d_temp)-int_lyg(delta_meta,d_temp)));
k2=exp(-((delta_vg(6)-
delta_vg(5))/(8.314*298.15)+(delta_vg(5)/(8.314*d_temp))...
+(int_lyg2(delta_vg,d_temp)/d_temp)-int_lyg(delta_vg,d_temp)));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Funkcija skaičiuoti gibso energijos pokyčiui
function int_gibs_dif1= int_lyg(dif,d_temp)
tau=d_temp/298.15;
int_gibs_dif1=dif(1).*log(tau)+((dif(2).*T_0+...
((dif(3)*T_0^2+(dif(4)/(tau^2.*T_0^2)))*(tau+1)/2)))*(tau-1));
end
function int_gibs_dif2= int_lyg2(var_sp,d_temp)
tau=d_temp/298.15;
int_gibs_dif2=var_sp(1).*T_0*(tau-1)+...
var_sp(2)*0.5*T_0^2*(tau^2-1)+var_sp(3)*T_0^3*(tau^3-1)/3+...
var_sp(4)*(tau-1)/(tau*T_0);
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%Rasti lambda ir gama koeficientus%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
norm_1_C=ele_sudetis(1)/(12);
norm_1_H=ele_sudetis(2)/(1.008);
norm_1_O=ele_sudetis(3)/(16);
norm_1_N=ele_sudetis(4)/(14.007);
lambda=norm_1_H/norm_1_C;
gama=norm_1_O/norm_1_C;
beta=norm_1_N/norm_1_C;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
x0=xx0;
iter=1;
iter_m=1;
spr=[];
v=0;
Dregmes_kiekis=[];
M=12+lambda*1.008+gama*16;
for N=1:length(v)
Dregmes_kiekis=[Dregmes_kiekis 18*100*v(N)/(M+18*v(N))];
end
Visi=M+18*v(N);
Dregmes_kiekis
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Pagrindinis ciklas lygčių sistemai spręsti
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for iter_m=1:length(v)
while(iter<=maxit)
y=-df1(x0)\f1(x0);
xn=x0+y;
err=max(abs(xn-x0));
if(err<=tol)
x=xn;
else
x0=xn;
end
iter=iter+1;
end
iter=1;
spr_temp=x;
spr=[spr spr_temp];
iter_m=iter_m+1;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
p=length(v);
N2=[];
for l=1:p
N2=[N2 spr(6,1)*3.76];
end
Gal_sud=[spr(1:5,1:p);N2];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Atsakymas=input('Ar norite rasti sintetinių dujų sudėtį sausos bazės atžvilgiu
(t/n): ','s');
%Atsakymas='t';
if Atsakymas=='n'
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Rasti bendrą dujų kiekį kiekvienam drėgmės atvejui
Visa_sudetis_m=[];
for n=1:p
Visa_sudetis_m=[Visa_sudetis_m sum(Gal_sud(1:6,n))];
end
Visa_sudetis_m % sugeneruotų dujų suma
else

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Rasti bendrą sugeneruotų dujų kiekį sausos bazės atžvilgiu kiekvienam drėgmės
atvejui
Sausa_galutine_sudetis=Gal_sud;
Sausa_galutine_sudetis(4,:)=[];
Visa_sudetis_m=[];
for n=1:p
Visa_sudetis_m=[Visa_sudetis_m sum(Sausa_galutine_sudetis(1:5,n))];
end
Visa_sudetis_m;
Gal_sud=Sausa_galutine_sudetis;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Visų komponentų išreiškimas moline arba tūrine frakcija
Galutine_sudetis=[];
for MM=1:length(Visa_sudetis_m)
    Sausa_galutine_m=[];
    if Atsakymas=='t'
l_in=length(xx0)-1;
    else
l_in=length(xx0);
    end
    for NN=1:l_in
Sausa_galutine_m=[Sausa_galutine_m;Gal_sud(NN,MM)/Visa_sudetis_m(MM)];
    end
Galutine_sudetis=[Galutine_sudetis Sausa_galutine_m];
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function f=f1(X)
x_1=X(1); x_2=X(2); x_3=X(3);x_4=X(4);x_5=X(5);m=X(6);
v_1=x_2+x_3+x_5-1;
v_2=x_1+x_4+2*x_5-v(iter_m)-(lambda/2);
v_3=x_2+2*x_3+x_4-2*m-gama-v(iter_m);
v_4=-k1*x_1^2+(x_5*(x_1+x_2+x_3+x_4+x_5+3.76*m));
v_5=x_2*x_4*k2-x_1*x_3;
v_6=x_1*t_duju(H_f_H2, C_p_H2, d_temp)+...
x_2*t_duju(H_f_CO, C_p_CO, d_temp)+...
x_3*t_duju(H_f_CO2, C_p_CO2, d_temp)+...
x_4*t_duju(H_f_H2O_g, C_p_H2O, d_temp)+...
x_5*t_duju(H_f_CH4, C_p_CH4, d_temp)+...
3.76*m*t_duju(H_f_N2, C_p_N2, d_temp)-...
sil_bio(ele_sudetis)-v(iter_m)*(H_f_H2O_l+1000);
f=[v_1; v_2;v_3;v_4;v_5;v_6];
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function df=df1(X)
x_1=X(1);
x_2=X(2);
x_3=X(3);
x_4=X(4);
x_5=X(5);
m=X(6);
df=[0,1,1,0,1,0;1 0 0 1 2 0; 0 1 2 1 0 -2;
-2*x_1*k1+x_5,x_5,x_5,x_5,2*x_5+(x_1+x_2+x_3+x_4+3.76*m),3.76*x_5; -
x_3,k2*x_4...
-x_1, k2*x_2, 0, 0; t_duju(H_f_H2, C_p_H2, d_temp), ...
t_duju(H_f_CO, C_p_CO, d_temp), t_duju(H_f_CO2, C_p_CO2, d_temp), ...
t_duju(H_f_H2O_g, C_p_H2O, d_temp), t_duju(H_f_CH4,
C_p_CH4, d_temp), 3.76*t_duju(H_f_N2, C_p_N2, d_temp)];
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function dh_sud=t_duju(H_sus, sav_sil, temp)
sil_koef=sav_sil;
dh_sud=H_sus+quad(@savitoji,298,temp);

```

```

function Savit_sil=savitoji(t)
Savit_sil=sil_koef(1)+sil_koef(2).*t+sil_koef(3).*t.^2+sil_koef(4).*t.^3;
end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Biomasės susidarymo šilumos nustatymas
%ASV yra apatinė biomasės šiluminė vertė, kJ/kg
%ASV_mol yra apatinė biomasės šiluminė vertė, kJ/kmol
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function H_s_bio= sil_bio(sud)
ASV=4.187*(81*sud(1)+300*sud(2)-26*sud(3)-54*sud(2));
ASV_mol=ASV*(12+lambda*1.008+gama*16);
H_s_bio=(lambda/2)*H_f_H2O_l+H_f_CO2+ASV_mol;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
end [24]

```

2 priedas. Biomosės dujinimo jėgainės techniniai parametrai (Įrangos gamintojas – Spanner Re²)



Note

- In order to be able to remove the screw conveyor of the secondary reformer, a minimum of 1500 mm of free space must be ensured on one side.
- The emergency filter must be set up in the direct vicinity of the combined heat and power unit. Position the emergency filter lower than the inlet manifold or the turbocharger of the engine. In order to be able to remove the fine filter cartridge, a minimum of 600 mm of free space must be ensured on one side.
- Also take into account the customer's wood chip loading system and the charcoal / ash discharge.
- The open areas of the wood gasifier and combined heat and power unit may overlap.

Dimensions and weights			
Plant (length x width x height)	5272 x 1540 x 2300 mm		
Electric cabinet (length x width x height)	818 x 405 x 2196 mm		
Room dimensions	7522 x 3040 x 2400 mm		
Cable length (optional)	3 m standard (optionally other lengths)		
Weight	2300 kg		
Floor load	500 daN/m ²		
Connections			
Heating circuit	DN25 (1 ") at 6 m ³ /h max.		
max. pressure loss of the plate heat exchanger	300 mbar		
Supply flow temperature	80–85°C, max. 85°C		
Return flow temperature	45–55°C, max. 60°C		
Gas line	DN65 (2 ½"), DIN 2633 (DN50 pipe)		
Electrical specifications	HV 35	HV 45	HV 49
Nominal current	1.5 A ¹⁾	2.7 A ¹⁾	2.7 A ¹⁾
Nominal power	0.8 kW ¹⁾	1.5 kW ¹⁾	1.5 kW ¹⁾
Electrical connection	400 V AC, 50 Hz		
Maximum current	12 A		
Maximum output	4.3 kW		
Ingress protection	IP 54 – IEC 60529		
Protection class I	IEC 60536		
Fuse protection	16 A, delay-action type (C)		
Control system	PLC (Sigmatek)		
Control voltage	24 V DC		
Operation	5" colour monitor with touch screen		
¹⁾ Without post-reformer			
Compressed air			
Inlet pressure	8-10 bar		
Consumption	50 NI/min		
Quality	Class 4 as per ISO 8573.1		
Connection (external diameter)	12 mm		
Control	Maintenance unit with a filter, oiler, pressure regulating valve, and pressure monitoring device		

Wood gas			
Composition	CO	17-20%	
	H ₂	13-16%	
	CH ₄	1-5%	
	CO ₂	7-12%	
	C _n H _n	0.1-0.5%	
	N ₂	rest	
Tar content	< 100 mg/Nm ³		
Heating value, approx.	4.5 MJ/m ³ = 1.25 kWh/m ³		
Volumetric flow rate, approx.	79 Nm ³ /h	102 Nm ³ /h	111 Nm ³ /h

Output characteristics ⁵⁾	HV 35	HV 45	HV 49
Energy content of the wood chips with 9% water content and 10% humidity	4.5 kWh/kg		
Rated thermal input at 200 m above sea level	141.8 kW	182.3 kW	198.5 kW
Heating power based on wood gas	123 kW	158.1 kW	172.2 kW
Cold gas efficiency	87 %	87 %	87 %
Thermal power	9.5 kW	12.2 kW	13.3 kW
Total power	132.5 kW	170.3 kW	185.5 kW
Efficiency	93.4 %	93.4 %	93.4 %

⁵⁾ Reference conditions: 25°C air inlet temperature, air pressure 100 kPa, relative humidity 30%, wood gas with a heating value of 1.3 kWh/m³. Fuel consumption tolerance +7%, thermal output tolerance +/-7%.

Operating conditions	
Relative humidity	< 75%, not condensing
Room temperature	10 – 40 °C
Room	closed, dry, min. 40 m ³ observe legal rules and regulations, recommendation: Fire resistance class F90

Emission values	
Sound pressure level (at a distance of 1 m)	< 56 dBA
Air exchange in the room	25 times/hour
Carbon monoxide (CO)	CO warning system required
Ex protection	The system produces a potentially explosive gas

Discharged ash/coal	without post-reformer	with post-reformer
Quantity, approx.	3–10% [kg] of applied wood chips	1-2 % [kg] of applied wood chips
Density	0.15–0.2 kg/dm ³	~ 0.2–0.9 kg/dm ³
Grain size	< 2.5 mm	< 1 mm
Loss of combustion	80% ⁶⁾	~ 3–50% ⁶⁾
Heating value, approx.	7 kWh/kg	0-6 kWh/kg

⁶⁾ Loss of combustion: Proportion of organic substance, depending on the applied wood chips and conversion rate of the post-reformer



Note

- The open areas of the wood gasifier and combined heat and power plant may overlap.
- In order to be able to remove the engine, sufficient free space of 750 mm minimum must be available.

Dimensions and weights	
Plant (length x width x height)	2600 x 924 x 2028 mm
Electric cabinet (length x width x height)	818 x 405 x 2196 mm
Room dimensions (recommended)	4100 x 2424 x 2400 mm
Cable length (optional)	7 m standard (optionally other lengths)
Weight	1800 kg
Floor load	500 daN/m ²

Connections	
Heating circuit	DN32 (1 ¼") at 10 m ³ /h max.
Supply flow temperature	80–85°C, max. 85°C
Return flow temperature	Max. 65°C
Gas line	DN65 (2½"), DIN 2633, (DN50 pipe)

Electrical specifications	CHP 35 kW	CHP 45 kW	CHP 49 kW
Electrical connection	400 V AC, 50 Hz		
Nominal power factor cosφ	0.97 ¹⁾	0.97 ¹⁾	0.97 ¹⁾
Nominal power	36/35 kVA/kW ²⁾	46/45 kVA/kW ²⁾	50/49 kVA/kW ²⁾
Nominal current	52.3 A ²⁾	67.2 A ²⁾	73.2 A ²⁾
Power shut-down after 10 seconds	> 39 kW	> 49 kW	> 55 kW
Power shut-down after 10 min.	> 38 kW	> 48 kW	> 54 kW
Ingress protection	IP 54 – IEC 60529		
Protection class I	IEC 60536		
Fuse protection	> 85 A (K)	> 100 A (K)	> 120 A (K)
Electrical connection	TN network TT network with FI/RCD type B (all current sensitive, 300 mA)		
Control system	PLC (Sigmatek)		
Control voltage	24 V DC		
Operation	5" colour monitor with touch screen		

Generator (asynchronous)	CHP 35 kW	CHP 45 kW	CHP 49 kW
Cooling	air-cooled		
Voltage	400 V		
Short circuit current	400 A	580 A	580 A
Frequency	50 Hz	50 Hz	50 Hz
Operating mode	S1	S1	S1
Ingress protection	IP 54	IP54	IP54
Overload and underload monitoring	Sigmatek	Sigmatek	Sigmatek
Generator circuit breaker	EATON / Siemens	EATON / Siemens	EATON / Siemens
Starting current	up to 200 A (peaks)	up to 250 A rising (4 seconds)	up to 250 A rising (4 seconds)
Starting behaviour	Engine start via the grid with star-delta starting	Engine start via the grid with 3-phase soft start	Engine start via the grid with 3-phase soft start

Technical data

Engine	CHP 35 kW	CHP 45 kW	CHP 49 kW
Type	PSI 5.7	PSI 5.7	OE 8.0
Layout	V-motor		
Method	4-stroke Otto engine		
Number of cylinders	V 8		
Engine displacement	5.7 l	5.7 l	8.0 l
Nominal speed	1520 1/min		

Wood gas	CHP 35 kW	CHP 45 kW	CHP 49 kW
Composition		CO 17-20% H ₂ 13-16% CH ₄ 1-5% CO ₂ 7-12% C _n H _n 0.1-0.5% N ₂ rest	
Tar content		< 100 mg/Nm ³	
Heating value, approx.		4.5 MJ/m ³ = 1.25 kWh/m ³	
Volumetric flow rate, approx.	79 Nm ³ /h	102 Nm ³ /h	111 Nm ³ /h

CHP output characteristics ²⁾	CHP 35 kW	CHP 45 kW	CHP 49 kW
Heating power of wood gas at 200 m above sea level	123 kW	158.1 kW	172.2 kW
Thermal power	70 kW	90 kW	98 kW
Electrical power	35 kW	45 kW	49 kW
Total power	105 kW	135 kW	147 kW
Thermal efficiency	56.9 %	56.9 %	56.9 %
Electrical efficiency	28.5 %	28.5 %	28.5 %
Total efficiency	85.4 %	85.4 %	85.4 %

Operating conditions	
Relative humidity	< 75%, not condensing
Room temperature	10 – 40 °C
Room	Closed, dry, 40 m ³ fire resistance class F90

Emission values			
Sound pressure level			
- CHP at a distance of 1 m	< 85 dBA	< 90 dBA	< 90 dBA
- Exhaust gas outlet at a distance of 1 m	< 55 dBA	< 55 dBA	< 55 dBA
Air exchange in the room	25 times		
Carbon monoxide (CO)	CO warning system required		
Ex protection	System operated with explosion-hazardous gas		
Exhaust gas ³⁾	CO	< 650 mg/m ³	
	NO _x	< 500 mg/m ³	
	Dust	< 30 mg/m ³	
	Benzene	< 1 mg/m ³	

Addendum:
Output characteristics of the Spanner plant (wood cogeneration plant) based on the energy content of the wood chips with 9% water content ²⁾

CHP + wood gasifier	CHP 35 kW	CHP 45 kW	CHP 49 kW
Energy content of the wood chips with 9 % water content and 10% humidity	4.5 kWh/kg		
Rated thermal input at 200 m above sea level	141.8 kW	182.3 kW	198.5 kW
Thermal power – CHP	70 kW	90 kW	98 kW
Thermal output of wood gasifier	9.5 kW	12.2 kW	13.3 kW
Thermal power – total	79.5 kW	102.2 kW	111.3 kW
Electrical power	35 kW	45 kW	49 kW
Total power	114.5 kW	147.2 kW	160.3 kW
Thermal efficiency	56.1 %	56.1 %	56.1 %
Electrical efficiency	24.7 %	24.7 %	24.7 %
Total efficiency	80.8 %	80.7 %	80.7 %

¹⁾ At $\cos\phi$ 0.97, select a circuit breaker for the generator

²⁾ In case of an installation altitude 200 m above sea level and an ambient temperature of 27°C, performance data in accordance with DIN ISO 3046-1, power tolerance: $\pm 5\%$, power reduction at $T > 40^\circ\text{C}$: 10%/10K, power reduction per 100 m installation altitude: up to 0.8 kW/100m.

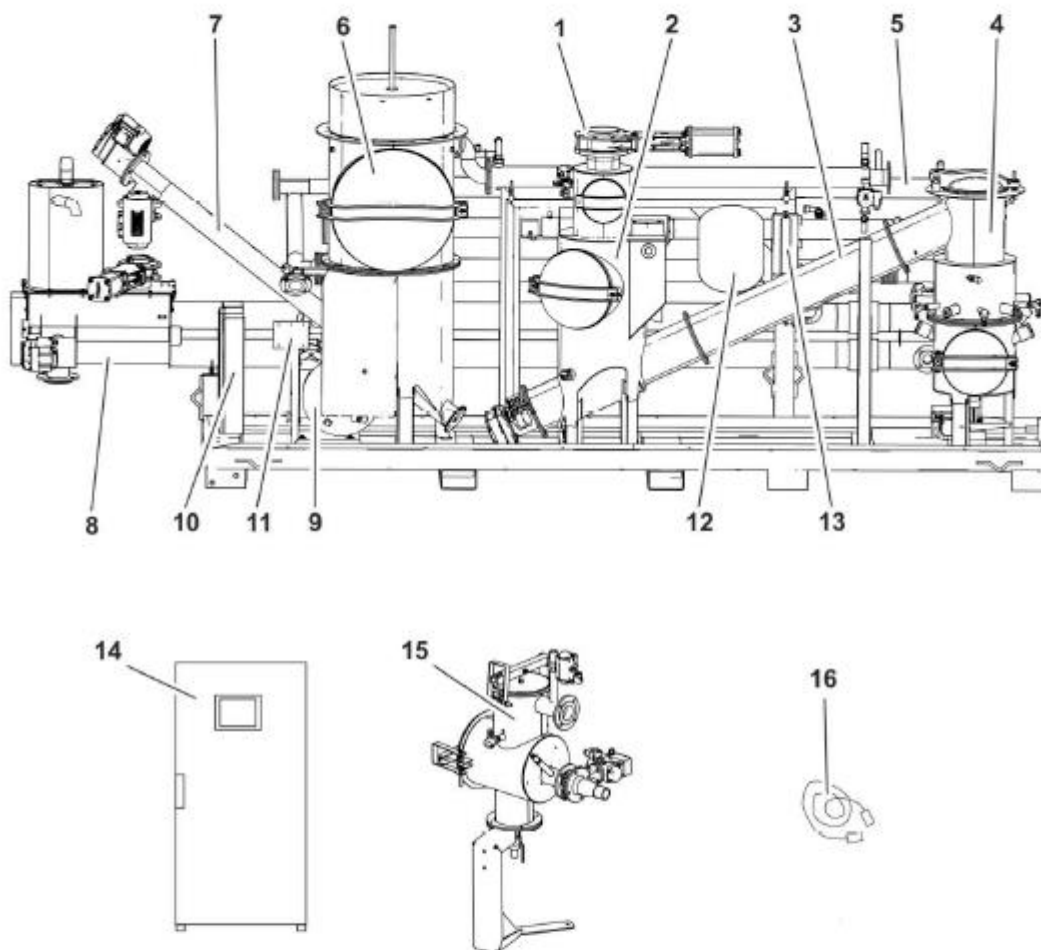
Reference conditions: 25°C air inlet temperature, air pressure 100 kPa, relative humidity 30%, wood gas with a heating value of 1.2 kWh/m³. Fuel consumption tolerance +7%, thermal output tolerance +/-7%.

³⁾ Exhaust gas value based on the measuring mode

3 priedas. Biomasės dujinimo jėgainės komponentų išdėstymo brėžiniai ir technologinės schemos (Įrangos gamintojas – Spanner Re²)

Description of the plant

5.2 Plant overview



000016

Fig. 4: Plant overview

1	Supply	10	Terminal box
2	Gate	11	Compressed air maintenance unit
3	Reformer worm gear	12	Expansion vessel
4	Reformer	13	Plate heat exchanger
5	Heat exchanger	14	Electrical cabinet with control modules
6	Gas filter	15	Emergency filter
7	Residual material worm gear	16	Connecting cable (electrical cabinet – terminal box)
8	Post-reformer		
9	Side channel compressor		

5.3 Flow diagram

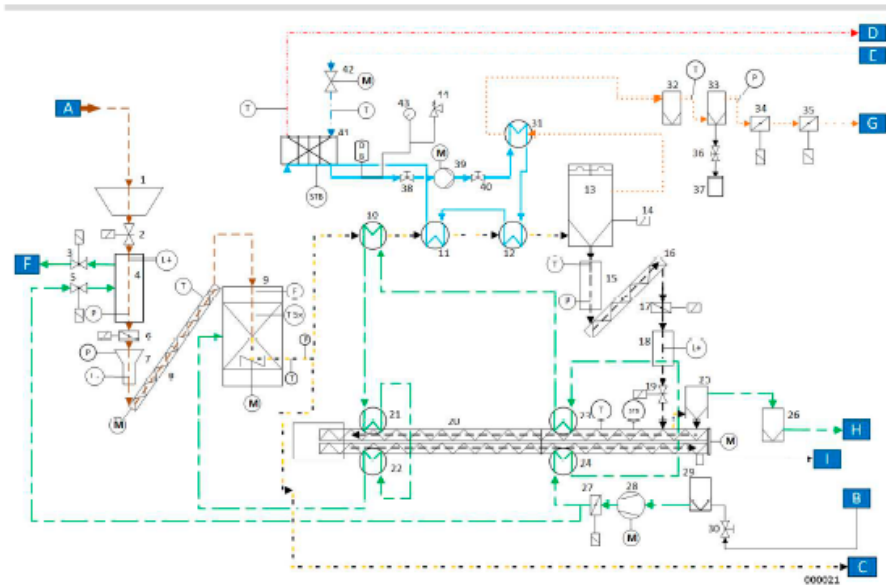


Fig. 5: Flow diagram

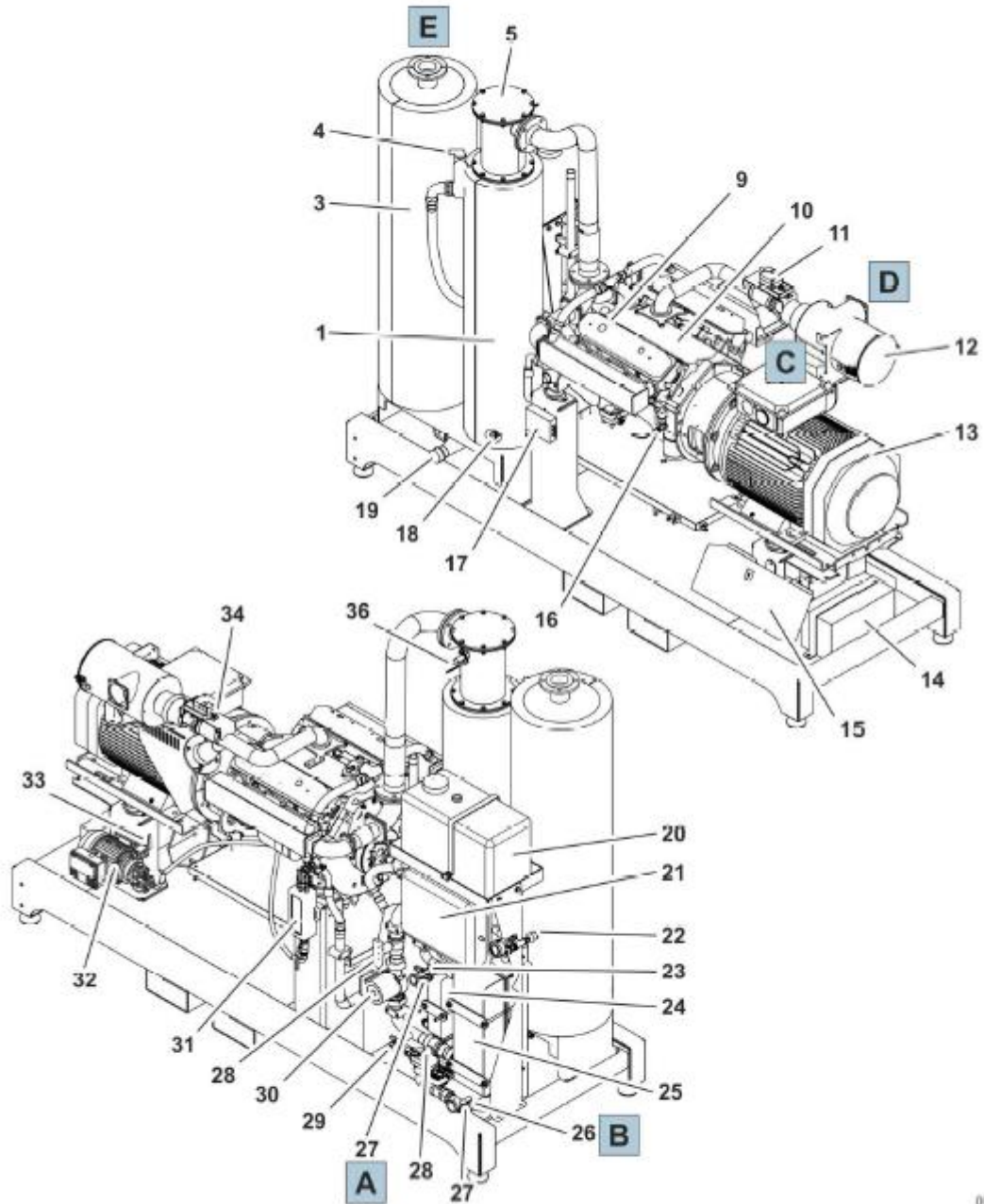
1 Funnel	23 Gas/air heat exchanger
2 Supply slider	24 Gas/air heat exchanger
3 Valve with actuator	25 Exhaust air filter
4 Supply	26 Air filter
5 Valve with actuator	27 Air flap
6 Sluice flap	28 Side channel compressor
7 Sluice	29 Air filter
8 Reformer screw conveyor	30 Air intake valve
9 Reformer	31 Gas/water heat exchanger
10 Gas/air heat exchanger	32 Mineral wool filter
11 Gas/water heat exchanger	33 Fine filter
12 Gas/water heat exchanger	34 Wood gasifier gas damper
13 Gas filter	35 CHP gas flap
14 Pneumatic cylinder	36 Condensate drain valve
15 Coal collecting bin	37 Collecting tank
16 Residual material conveyor	38 Stopcock
17 Residual material slider	39 Pump
18 Residual material sluice	40 Stopcock
19 Residual material flap	41 Plate heat exchanger
20 Post-reformer screw conveyors	42 Control valve
21 Gas/air heat exchanger	43 Pressure gauge
22 Gas/air heat exchanger	44 Pressure control valve
(F) Filling level sensor	(M) Drive

30.05.2017

37

(P) Pressure sensor	(M) Engine
(T) Temperature sensor	A Wood chip entrance
— Air	B Air entry
— Cold water	C Service gas line
— Hot water	D Supply flow
— Wood	E Return flow
— Cleaned wood gas	F Pressure compensation in supply line
— Coal	G Wood gas exit to CHP
— Gas coal	H Exhaust gas exit to CHP
	I ash discharge

5.1 Plant overview



000003

Fig. 3: Plant overview 35 kW plant and 49 kW plant without turbo

1	Exhaust gas heat exchanger	23	Temperature sensor (feed line to buffer storage)
2	Actuator motor for output control (Waste Gate) (only for plant with turbo)	24	Plate heat exchanger for oil cooler
3	Silencer	25	Plate heat exchanger for hot water
4	Breather valve for water circuit	26	Temperature sensor (return line from buffer storage)
5	Catalytic converter	27	Shut-off valves from/to buffer storage
6	Charge air cooler (only for plant with turbo)	28	Shut-off valves upstream and downstream of cooling water pump
7	Temperature sensor (charge air) (only for plant with turbo)	29	Water drain valve (draining the CHP)
8	Turbo charger (only for plant with turbo)	30	Cool water pump
9	Temperature sensor (motor)	31	Oil inspection glass with shut-off valve
10	Motor	32	Oil pump
11	Throttle valve with actuator motor	33	Switch lever for oil change
12	Air filter	34	Temperature sensor (air intake)
13	Generator	35	Pressure sensor (charge air) (only for plant with turbo)
14	Battery	36	Sensors
15	Terminal box		– Pressure sensor (exhaust gas)
16	Sensors		– Lambda sensor
	– Pressure sensor (oil)		– Temperature sensor (exhaust gas)
	– Temperature sensor (oil)		
17	Ignition	A	Water supply line to buffer storage
18	Drain valve on exhaust gas heat exchanger	B	Water return line from buffer storage
19	Cleaning opening for exhaust gas heat exchanger	C	Wood gas entrance (from wood gasifier)
20	Oil container	D	Air intake
21	Expansion vessel	E	Exhaust gas exit
22	Pressure sensor (cooling water)		

5.2 Flow diagram

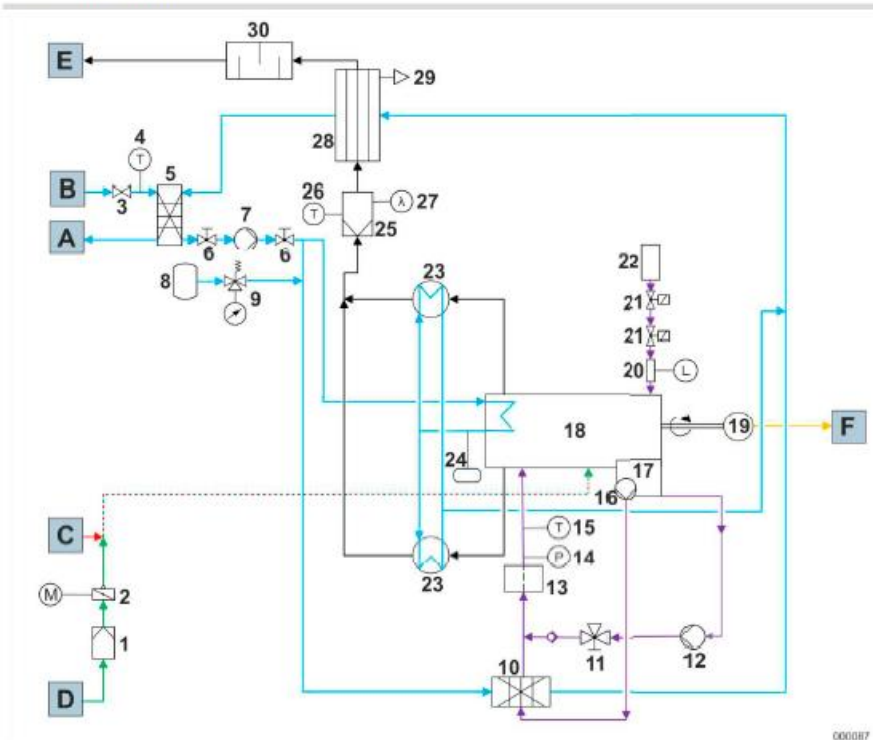


Fig. 5: System schematic 35 kW plant and 49 kW plant without turbo

— Water	A	Water supply line to buffer storage
— Exhaust gas	B	Water return line from buffer storage
— Oxygen	C	Wood gas entrance (from wood gasifier)
— Wood gas	D	Air intake
— Wood gas oxygen	E	Exhaust gas exit
— Oil	F	Power supply line to public power grid
— Power		

Fig. 6: System schematic 45 kW plant with turbo

1	Air filter	17	Oil pan
2	Throttle valve with actuator motor	18	Motor
3	Control valve	19	Generator
4	Temperature sensor (water return line)	20	Inspection glass for oil level display
5	Plate heat exchanger for hot water	21	Solenoid valve
6	Shut-off valve	22	Oil container
7	Water pump	23	Exhaust gas manifold
8	Expansion vessel	24	Safety temperature limiter
9	Pressure control valve with manometer	25	Catalytic converter
10	Plate heat exchanger for oil cooler	26	Temperature sensor (exhaust gas)
11	Switch-over valve	27	Lambda sensor
12	Oil pump	28	Exhaust gas heat exchanger
13	Oil filter	29	Breather valve
14	Pressure sensor (oil)	30	Silencer
15	Temperature sensor (oil)	31	Turbo charger (only for plant with turbo)
16	Motor oil pump	32	Charge air cooler (only for plant with turbo)

4 priedas. Biomasės dujinimo jėgainės eksploatacinėms sąnaudoms skaičiuoti naudojami koeficientai (Gamintojo, Spanner Re² informacija)

	Price per 1 KWh el. & 2 KWh thermal
Wood chips (20 € / ton)	0,02 €
Wear parts (0,022 € / KWh el.)	0,022 €
Manpower (30 € / h)	0,008 €
Total	<hr/> 0,05 €