



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

**Žilvinas Petrauskas**

**INOVATYVIOS KOGENERACINĖS ĮRANGOS  
PANAUDOJIMO PASTATO ENERGETINIAM APRŪPINIMUI  
GALIMYBIŲ STUDIJA**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Doc. dr. Robertas Poškas

**KAUNAS, 2016**

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

**INOVATYVIOS KOGENERACINĖS ĮRANGOS  
PANAUDOJIMO PASTATO ENERGETINIAM APRŪPINIMUI  
GALIMYBIŲ STUDIJA**

Baigiamasis magistro projektas  
Termoinžinerija (621E30001)

**Vadovas**

(parašas) Doc. dr. Robertas Poškas  
(data)

**Recenzentas**

(parašas) Prof. habil.dr. Stasys Šinkūnas  
(data)

**Projektą atliko**

(parašas) Žilvinas Petrauskas  
(data)

**KAUNAS, 2016**



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**

**MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO**

(Fakultetas)

**ŽILVINAS PETRAUSKAS**

(Studento vardas, pavardė)

**TERMOINŽINERIJA (621E30001)**

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Inovatyvios kogeneracinės įrangos panaudojimo pastato energetiniam aprūpinimui  
galimybių studija“

**AKADEMINIO SAŽINGUMO DEKLARACIJA**

20 16 m. gegužės 23 d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Žilvino Petrausko**, baigiamasis projektas tema „Inovatyvios kogeneracinės įrangos panaudojimo pastato energetiniam aprūpinimui galimybių studija“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

\_\_\_\_\_  
(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

\_\_\_\_\_  
(parašas)

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

**Tvirtinu:** \_\_\_\_\_  
Šilumos ir atomo energetikos (parašas, data)  
katedros vedėjas Doc. E. Puida  
\_\_\_\_\_ (vardas, pavardė)

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

Universitetinių antrosios pakopos (magistrantūros) studijų, kurias baigus įgyjamas magistro kvalifikacinis laipsnis, baigiamasis darbas yra mokslinio tiriamojo arba taikomojo pobūdžio projektas. Jam atlikti ir apginti skiriama 30 kreditų. Šiuo darbu studentas parodo, kad yra pasigilinęs ir papildęs pagrindinėse studijose įgytas termoinžinerijos žinias bei įgijęs pakankamai gebėjimų formuluoti ir kompleksiskai spręsti aktualią energetikos mokslo šakos problemą, savarankiškai atlikti teorinio ar taikomojo pobūdžio tyrimus. Taikydamas energetikos ir termoinžinerijos mokslo sričiai būdingus tyrimo metodus bei tyrimo priemones, baigiamajame darbe turi tinkamai interpretuoti atlikus tyrimą gautus duomenis, prirėikus atlikti techninį – ekonominį projekto pagrindimą, nustatyti poveikį aplinkai ir pateikti tyrimo rezultatais pagrįstas išvadas, turi pakankamai gebėjimų ir nemažą pasirinktos studijų krypties analitinio ar projektavimo darbo patirtį. Taip pat jis parodo, kad yra kūrybingas, išmano socialinės ir komercinės aplinkos, teisės aktų ir finansines galimybes, turi informacijos šaltinių paieškos ir jų analizės, projektavimo ir inžinerinės analizės, informacinių technologijų naudojimo ir rašytinio bendravimo, taisyklingos kalbos vartosenos įgūdžių, giliai suvokia nagrinėjamą temą, geba tinkamai formuluoti išvadas.

**1. Darbo tema** - Inovatyvios kogeneracinės įrangos panaudojimo pastato energetiniam aprūpinimui studija

Patvirtinta 2016 m. gegužės mėn. 03. d. dekanų įsakymu Nr. V25–11–7

**2. Darbo tikslas** – Išnagrinėti mikro turbinų ir kuro elementų technologijos veikimo principus, efektyvumą, apžvelgti technologijas. Atlikti mikroturbinos ir kuro elementų kogeneracinės sistemos pritaikymo analizę pasirinktam objektui. Atlikti šių kogeneracinių sistemų atsipirkimo analizę, atsižvelgiant į investicijas.

**3. Darbo struktūra**

1. Kogeneracinių energijos šaltinių technologijos apžvalga
2. Pritaikymo atvejo analizė
3. Įrangos galios parinkimas
4. Ekonominė projekto analizė

Išvados. Literatūra

**4. Reikalavimai ir sąlygos.** Baigiamasis darbas turi būti parengtas atsižvelgiant į galiojančių Lietuvoje teisės aktų reikalavimus, projektuojant naudoti Lietuvoje įteisintą įrangą.

**5. Užbaigto darbo pateikimo terminas:** 2016 m. gegužės mėn. 23 d.

**6. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo darbo dalis.**

Išduota studentui Žilvinui Petrauskui

Užduotį gavau: Žilvinas Petrauskas

(studento vardas, pavardė)

.....  
(parašas) (data)

Vadovas doc. Robertas Poškas

(pareigos, vardas, pavardė)

.....  
(parašas) (data)

Žilvinas, Petrauskas. INOVATYVIOS KOGENERACINĖS ĮRANGOS PANAUDOJIMO PASTATO ENERGETINIAM APRŪPINIMUI STUDIJA: *Magistro* baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Robertas Poškas; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: Šilumos energetika

Reikšminiai žodžiai: kogeneracija, kuro elementai, mikro turbinos, šilumos poreikiai, elektros energijos poreikiai

Kaunas, 2016. 50 p.

## SANTRAUKA

*Pastoviai augant energijos poreikiams pasaulyje, vis didesnę svarbą įgauna, kuo ekologiškesni, patikimesni ir mažiausiai sąnaudų reikalaujantys energijos gamybos metodai. Todėl energijos gamybai reikia taikyti inovatyvias ir efektyvias technologijas. Norint efektyviai gaminti elektros energiją, bei šilumos energija, jų gamyba turi būti kombinuota – naudojama kogeneracija. Taip pat kogeneracinėms sistemose turi būti naudojami inovatyvūs ir efektyvūs įrenginiai.*

*Šiame baigiamajame magistro darbe pastato energetiniam aprūpinimui parenkami inovatyvūs kogeneraciniai įrenginiai – kuro elementai ir mikroturbinos. Parenkama geriausiai tinkanti mikroturbina, bei kuro elementai pastato šilumos energijos, bei elektros energijos poreikiams tenkinti. Išnagrinėjamas šių įrenginių veikimas, privalumai, bei trūkumai. Įrenginiai pasirinktam pastatui – biurui, parenkami pagal išanalizuotus šio pastato šilumos ir elektros energijos poreikius. Atiliekamas ekonominis ir technologinis sistemos veikimo vertinimas. Apibendrinus teorines žinias, bei gautus skaičiavimų rezultatus, pateikiamos išvados ir pasiūlymai.*

Žilvinas, Petrauskas. FEASIBILITY STUDY OF INNOVATIVE USAGE OF COGENERATION EQUIPMENT FOR BUILDING ENERGY SUPPLY: *Master's* final project/ supervisor assoc. prof. Robertas Poškas. The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Research area and field: Thermal energy

Key words: cogeneration, fuel cells, microturbine, heat demand, electrical energy demand

Kaunas, 2016. 48 p.

## SUMMARY

*Constantly growing worlds energy needs, cause the growing importance of the most environmentally friendly, safe and cost effective energy production methods. Therefore, energy production requires the application of innovative and efficient technologies. For efficient production of electricity and thermal energy, the production must be combined –cogeneration must be used. Also innovative and effective equipment in these cogeneration systems has to be used.*

*In this thesis innovative cogeneration plants - fuel cells and microturbines are selected for building's energy supply. The best suited micro turbines and fuel cells are selected for buildings electricity and thermal energy needs. Operation, advantages and disadvantages of these facilities are examined. Devices are selected according to the selected buildings - office analyzed heat and power needs. The economic and technologic system performance evaluation is performed. Summarizing the theoretical knowledge and the obtained results, conclusions and recommendations are presented.*

## TURINYS

1	Kogeneracija .....	11
1.1	Kogeneracija Europoje .....	11
1.2	Kogeneracinių sistemų energijos šaltiniai .....	12
1.2.1	Mikroturbinos .....	12
1.2.2	Kuro elementai .....	13
1.3	Mikroturbinų technologijos apžvalga .....	14
1.3.1	Kuras .....	14
1.3.2	Mikroturbinos sandara .....	16
1.3.3	Mikroturbinos C65 techniniai duomenys .....	16
1.3.4	Mikroturbina trigeneracinėje sistemoje .....	18
1.4	Kuro elementų technologijos apžvalga .....	21
1.4.1	Protonų membranos apskaitimo kuro elementai (PEMFC) .....	23
1.4.2	Kieto oksido kuro elementai (SOFC) .....	24
1.4.3	Išlydyto karbonato kuro elementai (MCFC) .....	25
1.4.4	Fosforo rūgšties kuro elementai (PAFC) .....	26
1.4.5	Šarminiai kuro elementai (AFC) .....	26
1.4.6	Kuro elemento parinkimas .....	27
1.4.7	Kuro paruošimas .....	30
2	Analizuojamas pritaikymo atvejis .....	31
2.1	Objekto parinkimas .....	31
2.2	Pastato energijos poreikiai .....	31
2.2.1	Šiluminės energijos poreikiai .....	31
2.2.2	Energijos sąnaudos karštam vandeniui .....	32
3	Įrangos galios parinkimas pastato energetiniams poreikiams tenkinti .....	33
3.1	Dujinis katilas .....	34
3.2	Mikroturbinos galios parinkimas .....	34
3.2.1	Šiluminė galia .....	34
3.2.2	Elektrinė galia .....	35
3.3	Kuro elemento galios parinkimas .....	36
3.3.1	Kuro elemente sunaudojamas vandenilio kiekis .....	36
3.3.2	Reikiamas gamtinių dujų kiekis .....	37
3.3.3	Reikiamas oro kiekis .....	37
3.3.4	Išsiskyrusio vandens kiekis .....	38
3.3.5	Šiluminė galia .....	38
4	Ekonominiai skaičiavimai .....	40

4.1	Investicijos .....	40
4.2	Išlaidos gamybai.....	40
4.3	Elektros energijos kaina .....	41
4.4	Elektros energijos pertekliaus pardavimas elektros tinklams .....	41
4.5	Gamybinių išlaidų palyginimas ir atsipirkimas.....	42
4.6	Investicijų atsipirkimas .....	43
IŠVADOS .....		44



## LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Kuro elementų savybės [22].....	28
2 lentelė. Pastato energijos poreikiai .....	33
3 lentelė. Parinkto katilo duomenys.....	34
4 lentelė. Sistemos Nr. 1 suvartojamas kuras, šiluminė galia ir elektrinė galia.....	35
5 lentelė. Kuro elemento kuro suvartojimas .....	37
6 lentelė. Sistemos Nr. 2 suvartojamas kuras, šiluminė galia ir elektrinė galia.....	38
7 lentelė. Skaičiavimų duomenys sistemoms dirbant nominaliu režimu .....	39
8 lentelė. Reikiamos investicijos įrangai įrengti .....	40
9 lentelė. Sistemų pagaminama šiluminė energija ir išlaidos jai pagaminti .....	41
10 lentelė Elektros energijos kiekiai šildymo sezono metu .....	41
11 lentelė. Sistemų išlaidų kurui palyginimas .....	42

## PAVEIKSLĖLIŲ SĄRAŠAS

1 pav. Kogeneracijos naudojimas Europoje [3] .....	11
2 pav. Principinė mikroturbinos schema [19] .....	15
3 pav. Mikroturbinos sandara [20] .....	16
4 pav. Orinių guolių schema [20] .....	17
5 pav. Mikroturbinos trigeneracinė sistema [21] .....	18
6 pav. Mikroturbinos kogeneracinė sistema [21] .....	19
7 pav. Mikroturbinos ir absorbcinio aušintuvo trigeneracinė sistemos schema [21] .....	20
8 pav. Absorbcinio aušintuvo našumo priklausomybė nuo mikroturbinos apkrovimo [21] .....	20
9 pav. Absorbcinio aušintuvo našumo priklausomybė nuo aplinkos temperatūros [21] .....	21
10 pav. Kuro elemento struktūra [24] .....	22
11 pav. PEM kuro elemento veikimo principas [25] .....	23
12 pav. Kieto oksido kuro elemento veikimo principas [25] .....	24
13 pav. Kuro elementuose vykstančios reakcijos [23] .....	28
14 pav. Pastato schema [28] .....	31
15 pav. Mikroturbinos kogeneracinės sistemos schema [13] .....	36
16 pav. Kuro elemento kogeneracinė sistemos schema [13] .....	39

## ĮVADAS

Gaminant elektros energiją, neišvengiamai gaunami šilumos nuostoliai. Šiluminių jėgainių, kuriuose naudojamas iškastinis kuras ir gaminama tik elektros energija, naudingumas labai mažas ir siekia tik apie 40 %. Visa kita energijos dalis, šilumos forma iššvaistoma į aplinką – šiluma atiduodama aplinkos orui, ežero ar upės vandeniui. Todėl gaminti elektros energiją ir šilumą atskiruose įrenginiuose nėra tikslinga. Siekiant gaminti energiją kuo ekonomiškiau ir ekologiškiau, elektros energijos gamybos proceso metu, taip pat turi būti panaudota išsiskyrusi atliekinė šiluminė energija. Taip gaunamas didesnis bendras elektros ir šilumos energijos gamybos efektyvumas. Taupomas iškastinis kuras, kurio atsargos pasaulyje nepaliaujamai mažėja. Taip pat mažiau teršiama atmosfera, gaunami mažesni CO<sub>2</sub> dujų, sukeliančių klimato atšilimą, išmetimai. Norint tai pasiekti, energijos gamybai taikomi kogeneraciniai įrenginiai.

Vykdamas Europos Komisijos Horizon-2020 programą ir norint pasiekti tolimesnius energetikoje užsibrėžtus tikslus, Europos komisijos energijos taupymo ir emisijų mažinimo scenarijuje, šiuo metu didelis dėmesys skiriamas gyvenamiesiems ir komerciniams sektoriams. Pastoviai didėjant elektros energijos suvartojimui 2050 m. tikimasi dvigubai didesnio elektros energijos poreikio nei dabar. Šiam poreikiui patenkinti didelę perspektyvą turi mikrokogeneracinės sistemos ir kuro elementai. Šios sistemos gali prisidėti prie Europos energijos ir klimato tikslų įgyvendinimo ir užtikrinti pastovų ir reikiamą elektros energijos ir šilumos tiekimą gyvenamųjų namų ir komercinių pastatų vartotojams. Europos komisijos (Intelligent Energy Europe – IEE) finansuojame projekte CODE2 (Cogeneration Observatory and Dissemination Europe) [1] numatoma iki 2030 metų įrengti 1,7 mln. mikrokogeneracinių sistemų, dėl to metinis priminės energijos sutaupymas vidutiniškai būtų 240 PJ ir metinis CO<sub>2</sub> sumažinimas 14 Mton [2].

Šiame darbe bus apžvelgiamos kuro elementų ir mikroturbinų technologijos, savybės ir efektyvumas. **Darbo tikslas – Išanalizuoti mikroturbinų ir kuro elementų pritaikymo galimybes pastato energetiniam aprūpinimui.**

### **Darbo uždaviniai:**

- 1 Apžvelgti mikroturbinų ir kuro elementų technologijas, išnagrinėti veikimo principus ir efektyvumą.
- 2 Atlikti mikroturbinos ir kuro elementų kogeneracinės sistemos pritaikymo analizę pasirinktam objektui.
- 3 Įvertinti sistemos veikimą ekonominiais ir technologiniais aspektais.

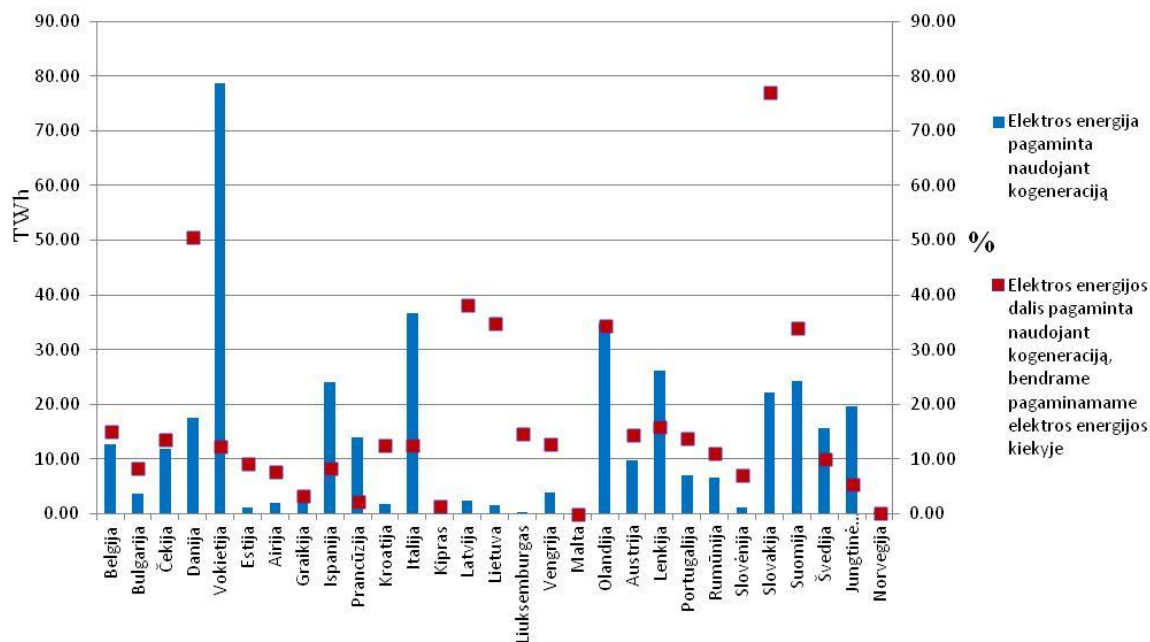
# 1 Kogeneracija

Kogeneracija – bendras elektros energijos ir šilumos energijos gamybos procesas, naudingai panaudojant išsiskyrusią šilumos energiją.

Sparčiai besivystant energijos tiekimo sistemoms, kombinuota elektros ir šilumos energijos gamyba tampa pagrindiniu prioritetu norint padidinti energijos gamybos efektyvumą ir sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimus į atmosferą.

## 1.1 Kogeneracija Europoje

Šiuo metu Europoje naudojant kogeneraciją pagaminama 11,7 % elektros energijos. Tačiau pagaminamos elektros energijos kiekiai naudojant kogeneraciją Europos šalyse yra labai skirtingi. 2013 m Eurostat duomenimis Lietuvoje pagaminama 1,65 TWh elektros energijos naudojant kogeneraciją, tai sudaro 35 % viso šalies pagaminto elektros energijos kiekio. Mažiausiai elektros energijos, naudojant kogeneraciją, pagaminama Kipre (1,4 %), Prancūzijoje (2,4 %), Norvegijoje (0,3 %), Maltoje (0 %) (1 pav.). Tuo tarpu daugiausiai - Slovakijoje (77 %), Danijoje (50,6 %), Latvijoje (38,3 %) [3].



1 pav. Kogeneracijos naudojimas Europoje [3]

Kogeneracinės sistemos gali būti didelės ir mažos galios. Didelės galios sistemos naudojamos miestų elektros energijos ir šilumos energijos poreikiams tenkinti. Mažos galios sistemos naudojamos atskiriems pastatams arba mažoms pastatų grupėms, šilumos energijos ir

elektros energijos poreikiams tenkinti. Paskutiniu metu, vis daugiau dėmesio pradedama kreipti į mažos galios kogeneracinių sistemų diegimą [4].

Šių sistemų įrengimas gyvenamuose namuose, visuomeniniuose pastatuose, pramonės objektuose turi privalumą, kad yra galimybė dirbti autonominiu režimu. Todėl galima atsisakyti arba įrengti šias sistemas kur nėra skirstomųjų elektros energijos ir šilumos energijos tinklų. Taip padidinamas saugumas dėl galimų gamtos ar žmogaus sukeltų trikdžių. Išvengiama žemės drebėjimų, karų ar teroristinių aktų galimai sukeliamų trikdžių. Sutrikus didelės pagrindinės centralizuotos jėgainės darbui, kiltų nemaži ekonominiai nuostoliai ir nepatogumai vartotojams. Tačiau esant energetiniam pastatų nepriklausomumui, šios problemos ženkliai sumažėja [5].

## **1.2 Kogeneracinių sistemų energijos šaltiniai**

Kogeneracinėse sistemose, kaip energijos šaltiniai naudojamos mašinos, kurios šiluminę, slėgio ir elektros energiją transformuoja į mechaninę energiją. Dažniausiai vidaus degimo variklis arba dujų turbina būna tokios sistemos energijos šaltinis. Šie įrenginiai veikia sukamuoju judesiu, todėl beveik visada komplektuojami kartu su elektros generatoriumi. Taip pat kogeneracinėse sistemose kaip pirminės energijos šaltinis naudojamos mikroturbinos, stirlingo varikliai bei kuro elementai [6].

### **1.2.1 Mikroturbinos**

Vienas iš pirminių energijos šaltinių - mikroturbina sumažinta dujų turbina versija. Mikroturbina gamina elektros energiją maždaug 30% naudingumu, pasižymi mažais kenksmingų dujų išmetimais į atmosferą bei reikalauja mažai priežiūros [7]. Mikroturbinos turi kelis privalumus lyginant su kitais kogeneracinių sistemų energijos šaltiniais, pvz. Vidaus degimo varikliais. Jos yra kompaktiško dydžio, mažo svorio, turi mažai judančių vidinių dalių ir pasižymi tyliu veikimu. Taip pat mikroturbinos kogeneracinėse sistemose gamina aukštos vertės atliekinę šilumą ir gali naudoti įvairų kurą: gamtines dujas, dyzeliną, sąvartynų dujas, etanolį, pramonines dujas [8]. Taip pat šio sistemos turi privalumą, kad gali dirbti autonominiu režimu. Todėl galima įrengti šias sistemas kur nėra skirstomųjų elektros energijos ir šilumos energijos tinklų. Taip padidinamas saugumas dėl galimų gamtos ar žmogaus sukeltų trikdžių.

*J. C. Bruno ir A. Coronas* įvertino mikro turbinų technologijos panaudojimo vietinei elektros energijos, šilumos energijos gamybai bei atvėsinto vandens kondicionavimui ruošimo

potencialą. Jie nustatė, kad naudojant mikroturbinų technologiją kogeneracijai ir trigeneracijai, padidėja energijos gamybos efektyvumas ir sumažėja šiltnamio efektą sukeliančių dujų, bei teršalų išmetimai į atmosferą [9].

*M.A. Ehyaei ir A. Mozafari* atliko mikroturbinos pritaikymo optimizavimą siekiant patenkinti pastato elektros energijos, bei šilumos energijos ir vėsinimo poreikius. Išanalizuoti skirtingi mikroturbinų pritaikymo atvejai 8000 m<sup>2</sup> ploto, 10 aukštų gyvenamajam pastatui Irane, Teherano mieste, aprūpinti [5].

### 1.2.2 Kuro elementai

Dar vienas iš aplinkai nežalingų kogeneracinių sistemų šaltinių - kuro elementai. Kuro elementai cheminę kuro energiją paverčia į elektros energiją, vykstant cheminei reakcijai su deguonimi ar kitais oksidavimo agentais. Lyginant su kitais kogeneracinių sistemų energijos šaltiniais, kuro elementai naudoja tik vandenilį ir deguonį. Kadangi vanduo yra vienintelis šalutinis produktas, kuro elementai laikomi vienu iš švariausių elektros energijos gamybos būdų. Dėl mažai judančių dalių kuro elemento konstrukcijoje, kuro elementai yra patikimesni, nei dujų turbina ar vidaus degimo variklis [6].

Pastaruosiu metu didelis dėmesys skiriamas mikrokogeneracinėms kuro elementų sistemoms, pastatų šilumos ir elektros energijos poreikiams tenkinti. Europos Komisijos projekte „ene.field“, numatoma nuo 2012 m. iki 2017 m. įrengti iki 1000 vnt. mikrokogeneracinių kuro elementų sistemų, pritaikytų gyvenamiesiems namams, 11 - koje Europos šalių. 2015 m. rugsėjo 9 dieną įrengtų mikrokogeneracinių sistemų skaičius gyvenamuose namuose, 8 – iuose ES šalyse buvo didesnis, nei ¼ visų planuojamų įrengti sistemų [10].

*Wenyuan Yang, Yingru Zhao, Vincenzo Liso ir Nigel Brandon* [11] ištyrė SOFC kuro elementų mikrokogeneracinės sistemos optimalų dizainą ir veikimą penkiuose skirtinguose Kinijos klimato zonose. Sistema pritaikyta 70 m<sup>2</sup> ploto butams, elektros energija ir šilumos energija aprūpinti.

*M. Gandiglio, A. Lanzini, M. Santarelli, P. Leone* [12] analizavo mikrokogeneracinę PEM kuro elementų sistemą pritaikytą gyvenamojo pastato grindiniam šildymui. Gautas efektyvesnis atliekinės šilumos panaudojimas, lyginant su tradicinėmis sistemomis.

*Alexandros Adam, Eric S. Fraga, Dan J.L. Brett* [13] analizavo SOFC ir PEFC tipo kuro elementų mikrokogeneracinės sistemos pritaikymo galimybes gyvenamajam pastatui. Gautas efektyvus atliekinės šilumos išnaudojimas ir CO<sub>2</sub> emisijų sumažėjimas.

*R. Napoli, M.Gandiglio, A.Lanzini, M.Santarelli* [14] atliko techninę – ekonominę PEMFC ir SOFC kuro elementų mikrokogeneracinių sistemų veikimo, skirtingų sezonų metu, analizę. Gautas mažesnis kuro suvartojimas naudojant SOFC tipo kuro elementus.

### **1.3 Mikroturbinų technologijos apžvalga**

Mikroturbinos – mažas, didelio greičio turbogeneratorius, sudarytas iš išcentrinio kompresoriaus, spindulinės turbinos ir generatoriaus [7]. Iš šiuo metu gaminamų mikroturbinų, vienas populiariausių gamintojų yra „Capstone”. Šių gamintojų mikroturbinose nėra tarpusavyje trintį sukeliančių dalių, todėl nėra poreikio dalių tepimui. Šiose mikroturbinose naudojami oriniai guoliai ir orinis aušinimas, taip atsiribojama nuo dažno skystų tepalų ir aušinimo skysčių keitimo, kurie yra žalingi aplinkai. Lyginant su panašaus dydžio tradiciniais stūmokliniais varikliais, šio tipo turbinos yra labiau panašios į didesnes elektrines jėgaines tuo, kad gali dirbti ilgą laiką visu galingumu ir reikalauja tik šiek tiek periodinės priežiūros. Todėl mikroturbinos idealiai tinka būti pirminiu pastovios energijos šaltiniu. Šiuo metu gaminamų mikroturbinų galia svyruoja nuo 30 kW iki 1MW, sujungus į bendrą sistemą gali būti pasiekta 30 MW galia [15]. Degimo procesas yra švarus ir nenutrūkstamas, panašus į šiuolaikinių dujų turbinų tipo elektrinių. Naudojama degimo technologija, kurią naudojant degimo proceso metu kontroliuojami išmetimai, dėl to nereikia papildomai įrenginėti katalizatorių.

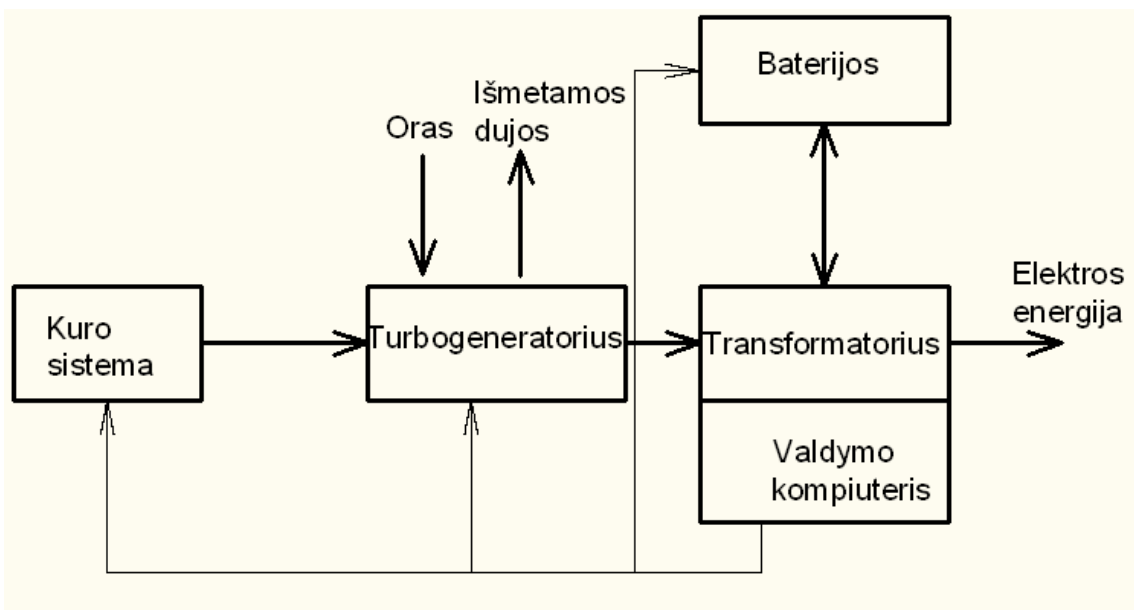
Svarbi mikroturbinos savybė-ilgas tarnavimo laikas. Gamintojai garantuoja jėgainės patikimo eksploatavimo trukmę nuo 40 000 iki 80 000 valandų. Labai nedidelės techninės priežiūros sąnaudos. Kas 8 tūkst. darbo valandų keičiami oro ir kuro filtrai bei uždegimo žvakės, purkštukai ir terminiai elementai – kas 20 tūkst. darbo valandų. Kapitalinis turbinos ir aukštos temperatūros kanalų remontas atliekamas po 40 tūkst. darbo valandų [16, 17].

#### **1.3.1 Kuras**

Dauguma gaminamų mikroturbinų gali veikti naudojant įvairų kurą, tokį kaip: gamtinės dujos, biodujos, dyzelinas, propanas. Viena iš mikroturbinos savybių yra ta, kad kuras į degimo kamerą turi būti įpurškiamas pakankamai dideliu slėgiu, nuo 3 iki 5 atmosferų. Todėl naudodami dujinį kurą, kuro suspaudimui reikalinga papildoma energija. Dujų turbinos gali

naudoti kurą, kuriame yra didesnis sieros kiekis. Vidaus degimo varikliams naudojamose dujose sieros neturi būti daugiau kaip 0,2–0,3 %, o mikroturbinose galima deginti sąvartynų, gamtines ir biodujas, kuriose yra didesni sieros kiekiai. Mažesnio galingumo (30 kW) „Capstone“ CR30 mikrotubinoje gali būti naudojamos iki 7 % H<sub>2</sub>S turinčios sąvartynų dujos. Didesnės galios modeliuose (CR 65, CR200, CR1000) H<sub>2</sub>S kiekis dujose galimas iki 0,5% [18].

Todėl dažniausiai sieros pašalinimo įranga nereikalinga, o deginant biodujas pakanka tik atskirti vandenį. Skirtingai nuo vidaus degimo variklių, kuriems minimali CH<sub>4</sub> koncentracija 60–65 %, dujų turbinose galima deginti dujas ir su 35 % metano kiekiu. Eksploatuojant mikroturbinas, nereikalinga ir dujų atskyrimo įranga, nes metano koncentracija paprastai yra didesnė. Daug paprastesnė ir pigesnė šilumos perdavimo sistema šilumnešiu. Vietoje 2–3 šilumokaičių įprastiniuose kogeneraciniuose blokuose išmetamas degimo dujas (apie 300-400 °C) galima nukreipti tiesiai į šilumokaitį arba šildymo katilą. Dujų turbinai nereikia avarinio aušinimo sistemos variklio apsaugai nuo perkaitimo, kai sumažėja šilumos poreikis. Perteklinė šiluma išmetama į aplinką. Dėl didelio oro pertekliaus degimo procese azoto oksidų ir anglies monoksido emisijos, esant standartinei 5 % deguonies koncentracijai, 5–10 kartų mažesnės, palyginti su vidaus degimo varikliais.



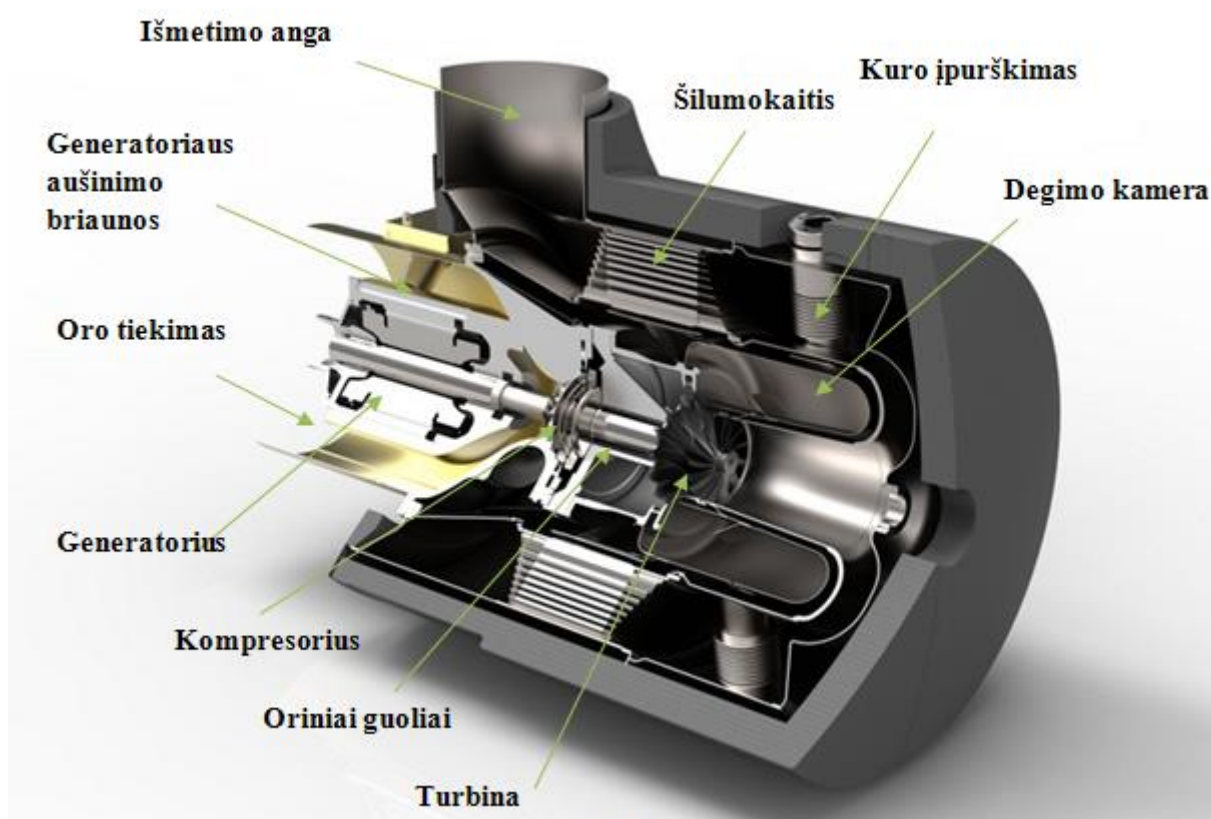
**2 pav.** Principinė mikroturbinos schema [19]

Suslėgtas kuras iš kuro sistemos tiekiamas į turbogeneratorių, kur mikroturbinos degimo kameroje yra maišomas su aplinkos oru tiekiamu iš kompresoriaus. Vykstant degimui karštos išmetamosios dujos suka turbiną, generatorius gamina aukšto dažnio elektros srovę, kuri tiekama į transformatorių ir elektros tinklus.



### 1.3.2 Mikroturbinos sandara

Mikroturbiną sudaro: paprastas spindulinis kompresorius, spindulinė turbina ir šilumokaitis, kuris pašildo degimo orą, taip padidindamas veiksmingumą (3 pav.). Dauguma šių turbinų turi vieną veleną, ant kurio sumontuoti spindulinis kompresorius, spindulinė turbina ir generatorius. Tokio tipo konstrukcija kartais vadinama "turbogeneratoriumi". Sukimosi greitis yra labai didelis 45,000 – 100,000 sūkių per minutę. Todėl generatorius gamina aukšto dažnio kintamąją srovę [18].



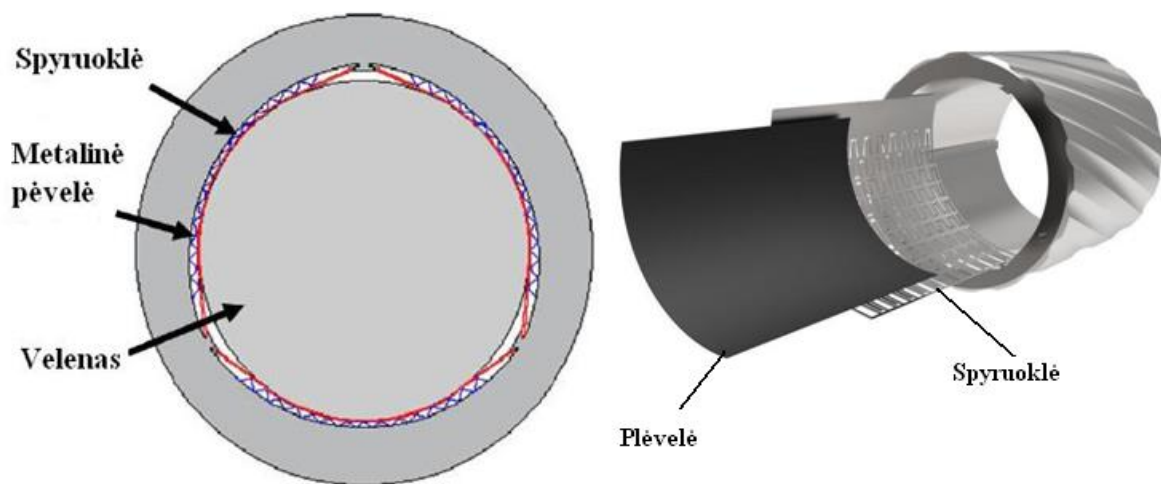
3 pav. Mikroturbinos sandara [20]

### 1.3.3 Mirkroturbinos C65 techniniai duomenys

- 1) Mikroturbinoje C65 yra tik viena besisukanti detalė – velenas, ant kurio sumontuoti: elektros generatorius, kompresorius ir pati turbina. Esant nominaliai apkrovai, velenas sukasi 96000 min<sup>-1</sup> greičiu specialiuose „oriniuose“ guoliuose (4 pav.). Velenui apsisukus 5 kartus, pasiekama apie 20000 aps/min. Tarp metalinio lydinio plėvelės ir veleno susiformuoja oro sluoksnis. Šis oro sluoksnis pakelia metalinę plėvelę nuo veleno. Spyruoklė suteikia atramą metalinei plėvelei ir oro sluoksniui, velenas laikosi

centre spaudžiamas oro sluoksnio. Po šio pakilimo nėra kontakto tarp metalinių dalių, todėl nėra trinties ir detalių dilimo.

- 2) Šios 30 kW elektrinės galios mikroturbinos elektrinis naudingumas  $29(\pm 2) \%$ ; utilizuojant šalinamą degimo produktų šilumą bendras naudingumas yra 85 %;
- 3) Elektros generatorius aušinamas iš kompresoriaus į degimo kamerą tiekiamu oru, todėl nereikalinga jo aušinimo skysčiu sistema. Jėgainė veikia be vibracijų, o į aplinką sklinda 65-70 db triukšmas;
- 4) Mikroturbinos C 65 degimo kameroje gali būti deginamos gamtinės dujos, suskystintos dujos, dyzelinis kuras. Į aplinką šalinamuose degimo produktuose tėra  $<9$  ppmv, arba  $<19$  mg/m<sup>3</sup>, NO<sub>x</sub> ir 40 ppmv CO (duomenys skaičiuoti, degimo produktuose esant 15% O<sub>2</sub>) – tai atmosferos tarša, gerokai mažesnė nei leidžia Lietuvoje galiojantys taršos iš stacionarių taršos šaltinių normatyvai;
- 5) mikroturbinos C 65 darbo trukmė iki kapitalinio remonto – 60000 h. Po kapitalinio remonto mikroturbina vėl gali dirbti 60000 h;
- 6) leidžiamas paleidimų / stabdymų kiekis per metus – 1000 kartų. Mikroturbinos apkrova reguliuojama tolygiai tarp 0% ir 100%. Pastebimas tik nedidelis mikroturbinos naudingumo sumažėjimas esant nedidelėms apkrovoms;
- 7) mikroturbina C 65, palyginti su vidaus degimo varikliais, pasižymi itin mažomis eksploatacijos išlaidomis;
- 8) mikroturbina gali veikti autonominiu režimu ar drauge su šalies elektros tinklais.

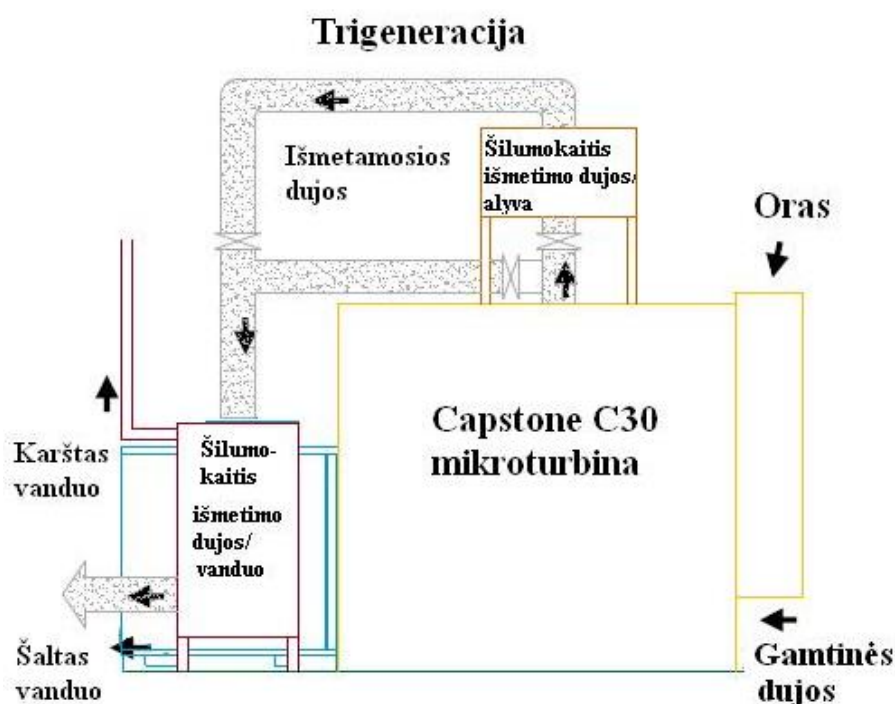


**4 pav.** Orinių guolių schema [20]

### 1.3.4 Mikroturbina trigeneracinėje sistemoje

Trigeneracija – vienu metu gaminama elektros energija, šilumos energija ir šaltis, naudojant vieną pirminį energijos tiekimo įrenginį, naudojant iškastinį kurą ar atsinaujinančius energijos šaltinius. Šilumos energija sugražinta iš pirminio energijos šaltinio, tiekama į šilumos energiją naudojančią šaldymo sistemą, kurioje gaminamas šaltis. Gaminti elektros energiją, šilumą, bei šaltį vienoje trigeneracinėje sistemoje yra efektyviau, nei elektros energija pirkti iš skirstomųjų tinklų ir šilumos energiją ir šaltį gamintis vietoje naudojant katilus ir kompresorinius įrenginius.

Mažos galios trigeneracinės sistemos, su absorbciniais aušintuvais, naudojančios mikroturbinas, kaip šilumos šaltinį komplektuojamos su dujų/vandens šilumokaičiu. Tokiu atveju, esant žemai temperatūrai, naudojami viengubo efekto H<sub>2</sub>O/LiBr vandeniu aušinami absorbciniai aušintuvai. Esant vandens aušinimui reikalingas vandens bokštas, kuris dažnai nėra pageidaujamas dėl išlaikymo sudėtingumo, kainos ir legionelos bakterijų atsiradimo pavojaus. Taip pat, šiuo atveju, tokios sistemos nėra labai efektyvios.

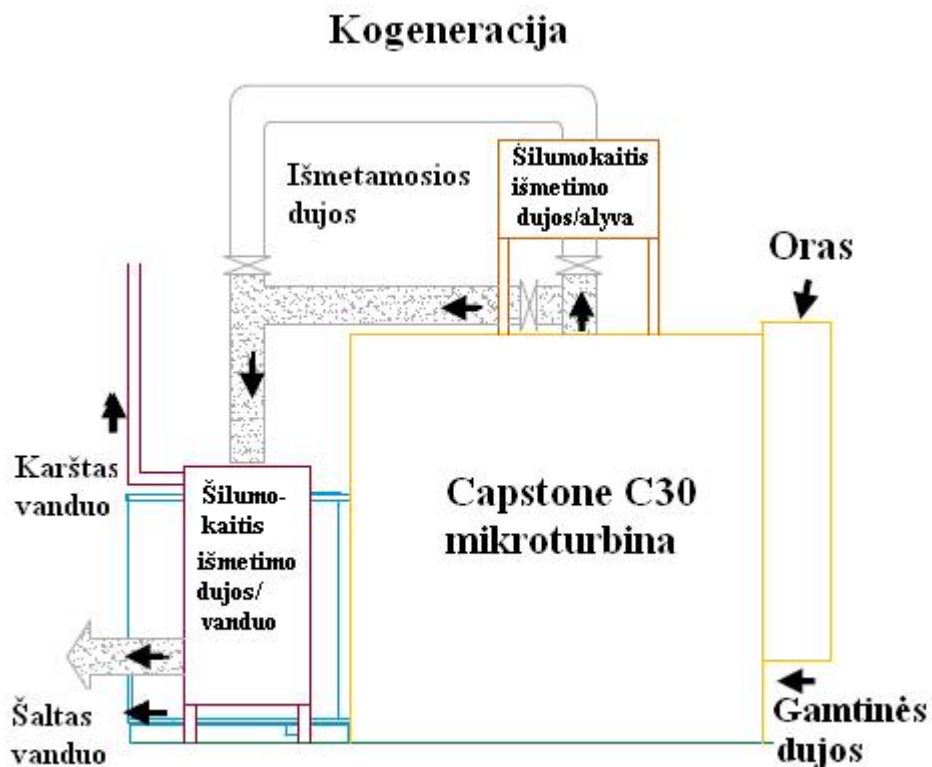


5 pav. Mikroturbinos trigeneracinė sistema [21]

Esant poreikiui neįrenginėti vandens aušinimo bokšto, pasirenkama trigeneracinė sistema, kurią sudaro oru aušinamas absorbcinis aušintuvas ir šilumos energijos šaltinis – mikroturbina. Norint pasiekti didesnę lankstumą, naudojamas alyvos/išmetamųjų dujų

šilumokaitis, kuriam šiluma perduodama iš mikroturbinos išmetamųjų dujų. Naudojant šį šilumokaitį, papildomai galima naudoti saulės kolektorius, kurie kaip šilumnešį naudoja alyvą. Tokiu būdu, vienu metu galima tiekti šilumą iš mikroturbinos ir saulės kolektorių.

Ši trigeneracinė sistema gali dirbti dviem skirtingais režimais: kogeneraciniu arba trigeneraciniu. Esant trigeneraciniam režimui išmetamųjų dujų šiluma perduodama į dujų/alyvos šilumokaitį, kuris aktyvuoja absorbcinį aušintuvą (5 pav.). Dalis likusios atliekinės išmetamųjų dujų šilumos patenka į antrą šilumokaitį karšto vandens ruošimui ar šildymo reikmėms.

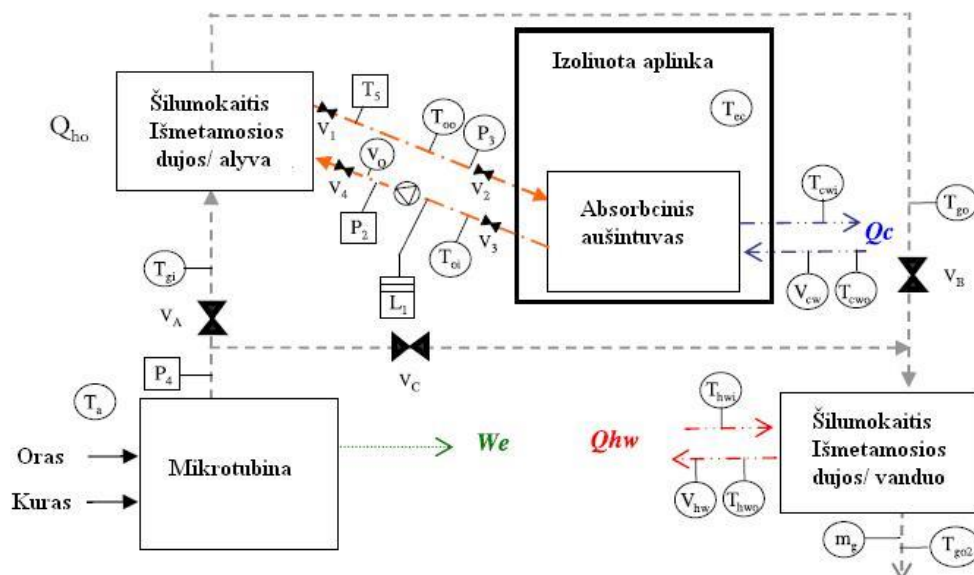


**6 pav.** Mikroturbinos kogeneracinė sistema [21]

Kai nėra poreikio atvėsinto vandens ruošimui, sistema gali dirbti kogeneraciniu režimu. Šiuo atveju mikroturbinos išmetamosios dujos naudojamos tiesiogiai dujų/vandens šilumokaityje, karšto vandens gamybai (6 pav.).

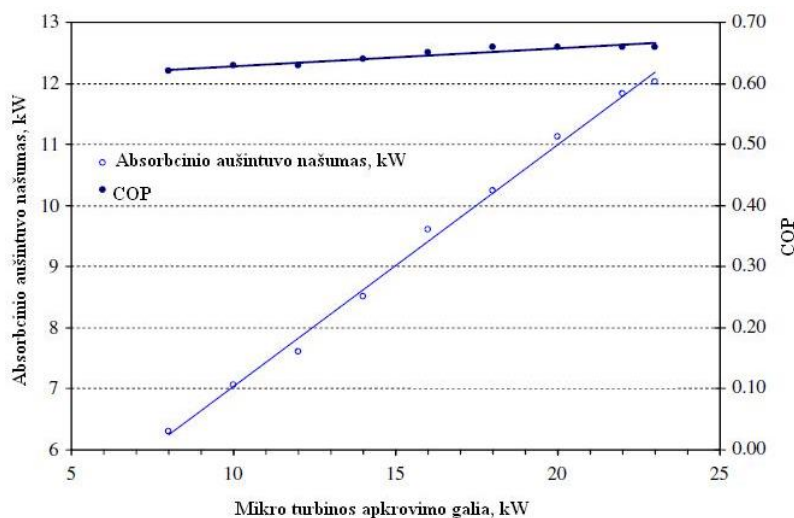
Priešpriešinio tekėjimo šilumokaičiuose, kai vienas iš fluidų yra dujos, naudojama daugybė briaunuotų apvalių vamzdelių ir apvalių plokštelių. Šiame alyvos/išmetamųjų dujų šilumokaityje, alyva teka vamzdelių viduje, o dujos statmenai apteka šiuos vamzdelius. Šis šilumokaitis turi tris vamzdelių junginius, po 40 vamzdelių kiekviename. Alyva įteka į šilumokaitį per viršutinį įtekėjimo vamzdį ir išteka per apačią. Absorbcinio aušintuvo veikimui, alyvos įėjimo temperatūra turi būti 190 - 240 °C. Pasirenkant įrenginius ir apytakos dalis svarbu atsižvelgti į aukštą tepalo temperatūrą.

Karšti degimo produktai iš mikroturbinos tiekiami į šilumokaitį, kur šiluma perduodama šilumnešiui – alyvai. Išmetamosios dujos iš alyvos šilumokaičio tiekiamos į vandens šilumokaitį, kur išmetamųjų dujų šiluma perduodama vandeniui (pav. 7). Alyva tiekia šilumą į absorbcinį aušintuvą, kur gaminamas atvėsintas vanduo.



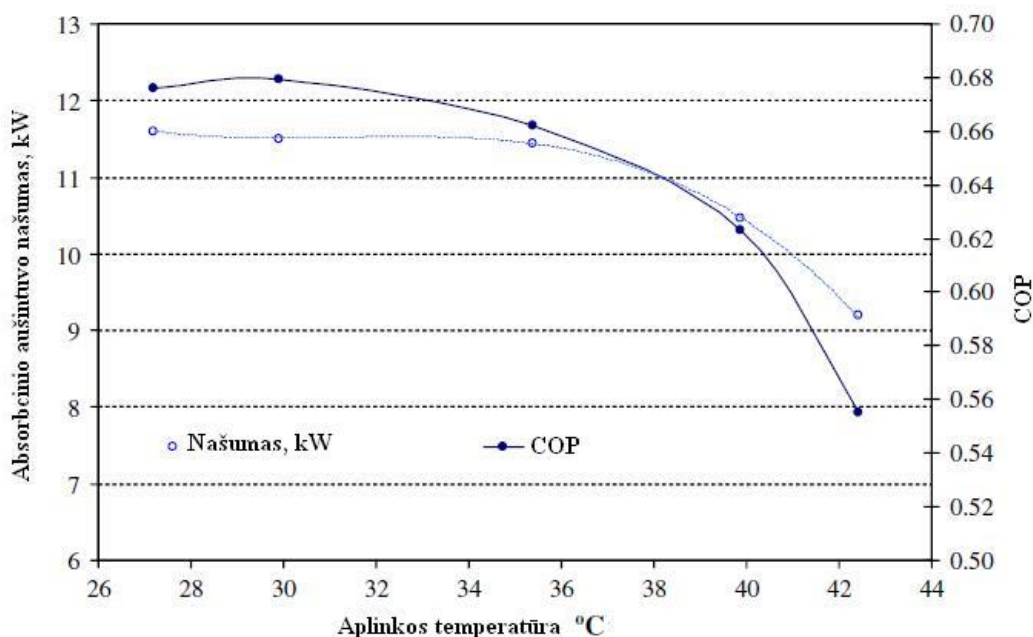
7 pav. Mikroturbinos ir absorbcinio aušintuvo trigeneracinė sistemos schema [21]

Absorbcinio aušintuvo našumas ir efektyvumas priklauso nuo aplinkos temperatūros dėl kelių skirtingų priežasčių (8 pav.). Kintanti aplinkos temperatūra veikia mikroturbinos veikimo efektyvumą. Netiesiogiai efektyvumas kinta, didėjant aplinkos temperatūrai 1 C absorbcinio aušintuvo našumas padidėja 1 kW. Tiesiogiai aplinkos temperatūros padidėjimas kondensatoriuje ir absorberyje gali sumažinti absorbcinio aušintuvo našumą 0,1-1,5 kW, temperatūrai padidėjus vienu laipsniu, 30-42 C laipsnių aplinkos temperatūros intervale.



8 pav. Absorbcinio aušintuvo našumo priklausomybė nuo mikroturbinos apkrovimo [21]

Trigeneracinės sistemos veikimui taip pat didelę įtaką daro mikroturbinos apkrovimo kitimas (8 pav.). Kuo didesnis gaminamo elektros energijos kiekis ir turbinos apkrovimas, tuo išmetamųjų dujų temperatūra ir alyvos temperatūra šilumokaityje yra didesnė. Dėl aukštesnės alyvos temperatūros į absorbcinį aušintuvą tiekama daugiau šilumos, tai ir lemia našumo padidėjimą.



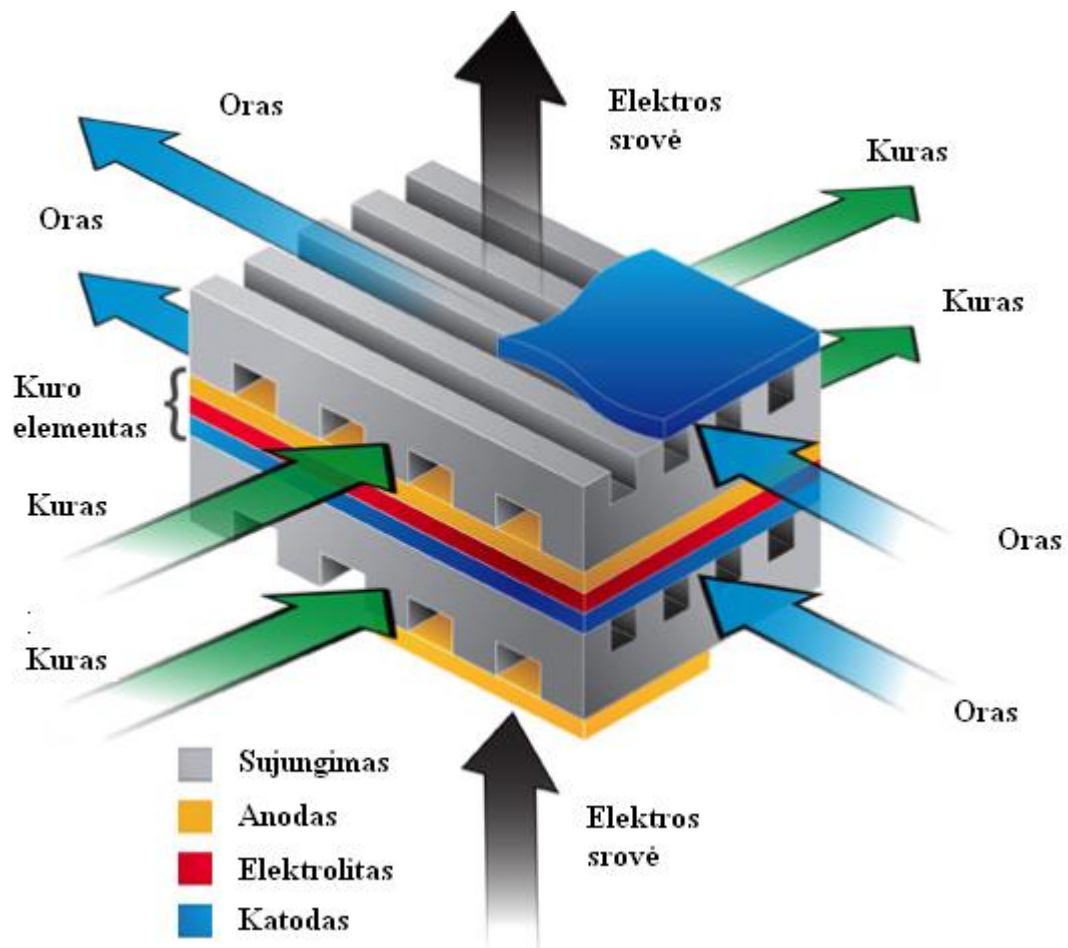
**9 pav.** Absorbcinio aušintuvo našumo priklausomybė nuo aplinkos temperatūros [21]

Tačiau absorbcinio aušintuvo naudingo veikimo koeficientas (COP angl. k) yra beveik pastovus ir kinta nežymiai. Alyvos temperatūros padidėjimas COP kitimui turi nedidelę reikšmę, tačiau turi didesnę poveikį absorbcinio aušintuvo našumo kitimui.

#### 1.4 Kuro elementų technologijos apžvalga

Kuro elementas - elektrocheminis įrenginys, kuris cheminės reakcijos energiją tiesiogiai verčia į elektrinę. Kuro elementai gali būti įdiegti didelėse elektrinėse, gyvenamuose namuose, transporto priemonėse (automobiliuose, autobusuose). Kuro elementą sudaro elektrolitas ir du elektrodai: anodas ir katodas. Veikiant kuro elementui vandenilis yra nepertraukiamai tiekiamas į anodą, o oksidatorius – į katodą. Kaip oksidatorius dažniausiai naudojamas oras. Vykstant cheminėms reakcijoms gaunama elektros energija ir šilumos energija. Kuro elementai yra panašūs į baterijas, bet skirtingai nei baterijos, energijos nekaupia, o ją konvertuoja. Kuro elementas veikia esant kuro ir oksidatoriaus nenutrūkstamam veikimui [22].



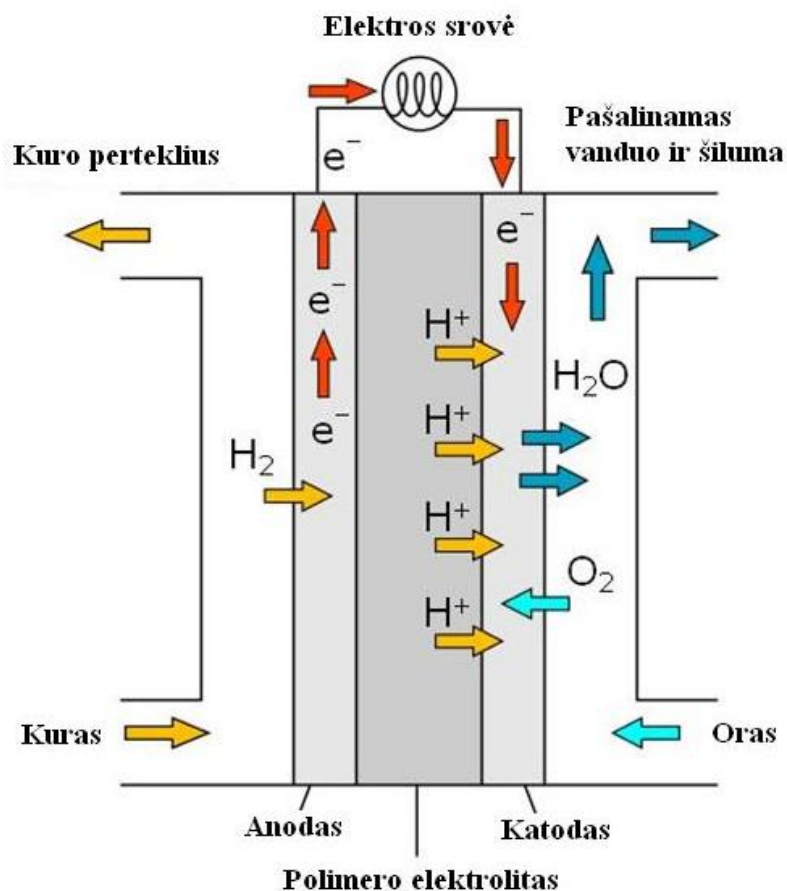


**10 pav.** Kuro elemento struktūra [24 ]

Kuro elementai skiriasi nuo kitų kogeneracinių sistemų energijos generavimo įrenginių, kad vietoj iškastinio kuro elektros energijos gamybai naudojamas vandenilis ir deguonis. Kuro celių sistemos turi mažai judančių dalių, dėl to pasižymi didesniu patikimumu, nei vidaus degimo varikliai ar dujų turbinos. Tačiau yra keletas kliūčių kuro elementų gamybai ir plačiam naudojimui. Pagrindinis šios technologijos trūkumas - procesams reikalingų medžiagų (deguonies ir vandenilio) gamybos metu sunaudojamas didelis kiekis energijos ir išmetamosios dujos į atmosferą. Kuro elementams vandenilis išgaunamas iš vandens elektrolizės būdu arba iš gamtinių dujų. Abu šie išgavimo būdai reikalauja didelių energijos sąnaudų ir sukelia gamybos proceso metu susidariusių dujų emisijas į atmosferą.

Šiuo metu rinkoje yra siūlomi įvairių tipų kuro elementai: protonų apsikeitimo membranos kuro elementai (PEMFC), Šarminiai kuro elementai (AFC), fosforo rūgšties kuro elementai (PAFC), išlydyto karbonato kuro elementai (MCFC) ir kieto oksido kuro elementai (SOFC)

### 1.4.1 Protonų membranos apsikeitimo kuro elementai (PEMFC)



**11 pav.** PEM kuro elemento veikimo principas [25]

Taip pat šie kuro elementai dar vadinami polimero elektrolito membranos (PEM) kuro elementais. Šie kuro elementai lyginant su kitais kuro elementais turi didelį galios tankį, todėl yra mažesnio svorio ir tūrio, nei kiti kuro elementai. PEM tipo kuro elementuose naudojami kieto polimero elektrolitas ir korėti anglies elektrodai, kuriuose yra platinos ar platinos lydinio katalizatorių. Šių elementų veikimui užtenka vandenilio, deguonies iš oro ir vandens. Naudojamas kuras – vandenilis, kuris tiekiamas iš saugyklos talpos arba reformatoriaus.

PEM tipo kuro elementų darbinė temperatūra santykinai maža, maždaug  $80^{\circ}C$ . Maža darbinė temperatūra lemia greitesnį kuro elemento paleidimą ir mažesnę įšilimo laiką, todėl sistema mažiau dėvėsi ir yra ilgaamžiškesnė. Tačiau, šiuose kuro elementuose, kaip katalizatorius vandenilio elektronų ir protonų atskyrimui, naudojamas vienas iš tauriųjų metalų – platina. Platinos katalizatoriai yra jautrūs anglies monoksidui, dėl to reikia įrenginėti papildomą reaktorių anglies monoksido sumažinimui, kurį naudojamose dujose (kai vandenilis išgautas iš angliavandenilinio kuro). Platinos naudojimas ir papildomas reaktoriaus

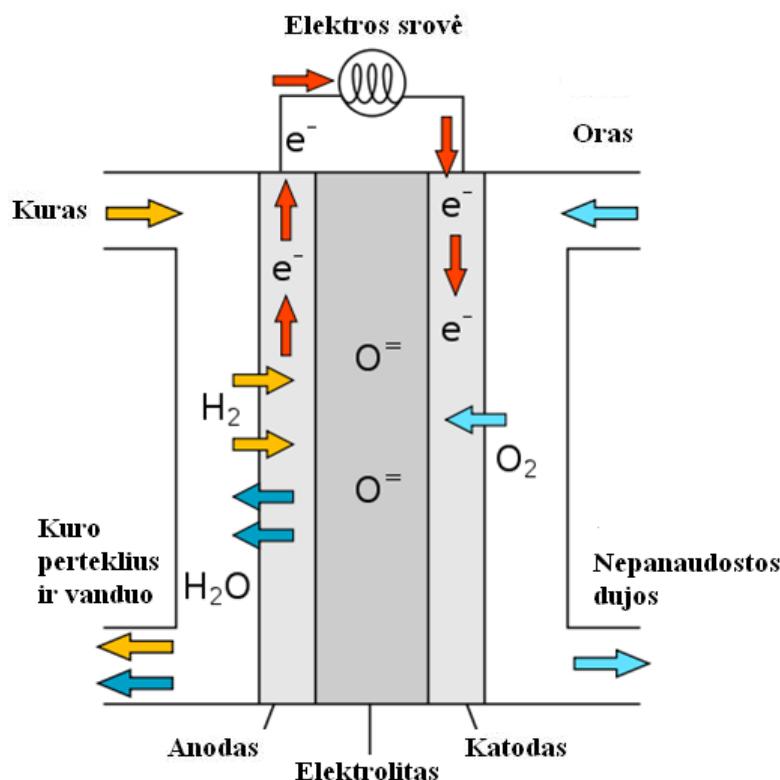


įrengimas padidina šio kuro elemento įrengimo kainą. PEM tipo kuro elementai dėl greito paleidimo ir didelio galios/svorio santykio tinkami naudoti transporto srityje, lengviesiems automobiliams ir autobusams [22, 23]

#### 1.4.2 Kieto oksido kuro elementai (SOFC)

Kieto oksido kuro elementai pradėti vystyti nuo 1950 m., todėl tai yra pakankamai brandi technologija. Kieto oksido kuro elementuose, kaip elektrolitas naudojamas kietas, nekorėtas keramikos junginys (cirkonio oksidas stabilizuotas su itrio oksidu). Tai leidžia elektrolitą pagaminti vabzdžio, plokščios ir vientisos formos. Vientisa elektrolito keramikos forma sumažina korozijos problemas ir padidina kuro elemento atsparumą aukštai temperatūrai.

Elektros energijos gamybos naudingumas siekia iki 60%. Kogeneracinėse sistemose išnaudojant atliekinę šilumą pasiekiamas 85 % naudingumo koeficientas. SOFC darbinė temperatūra yra aukšta ir siekia iki 1000 °C. Dėl aukštos darbinės temperatūros pranyksta poreikis naudoti brangiųjų metalų katalizatorius, dėl to sumažėja įrenginio kaina. Taip pat dėl aukštos darbinės temperatūros, kieto oksido kuro elementuose kuras reformuojamas pačiame kuro elemente. Todėl nereikia įrenginėti reformatoriaus ir galima naudoti įvairias kuro rūšis.



12 pav. Kieto oksido kuro elemento veikimo principas [25]

Reakcijos vykstančios kieto oksido kuro elemente [23]:

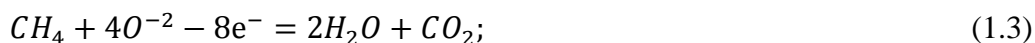
Prie katodo:



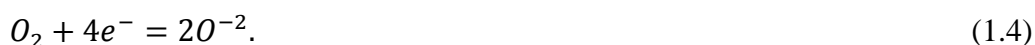
arba



arba



Prie anodo:



Šio tipo kuro elementai, lyginant su kitais kuro elementais yra labiausiai atsparūs sierai. Taip pat SOFC elementams nėra pavojingas anglies monoksidas, kuris gali būti naudojamas kaip kuras. Ši savybė leidžia kieto oksido kuro elementams, kaip kurą naudoti gamtines dujas, biodujas ir dujas išgautas iš anglies. Aukšta darbinė temperatūra turi ir trūkumų. Šiems kuro elementams įšilti iki darbinės temperatūros reikia ilgo laiko, taip pat reikia efektyvios šiluminės izoliacijos norint išlaikyti šilumą. Todėl šie kuro elementai nėra tinkami transporto srityje. Esant aukštai darbinei temperatūrai keliami aukšti reikalavimai naudojamiems medžiagoms. Pigesnių medžiagų atsparių aukštai temperatūrai kūrimas leistų atpiginti šią technologiją. Šiuo metu nagrinėjamas potencialas sukurti mažesnės temperatūros SOFC, kurių darbinė temperatūra būtų apie 700°C. Tai leistų sumažinti šių kuro elementų kainą ir padidinti ilgaamžiškumą, bet šiuo metu žemesnės temperatūros SOFC efektyvumas mažas [22, 23]

### 1.4.3 Išlydyto karbonato kuro elementai (MCFC)

Išlydyto karbonato kuro elementai pritaikomi elektros energijos gamybai, pramonės ir karinėje srityse, jėgainėse naudojančiuose dujinį ir anglies kurą. Šio tipo kuro elementuose, kaip elektrolitas naudojamas išlydytas druskos karbonato mišinys, kuris patalpintas akytoje chemiškai inertinėje keramikos ličio aliuminio oksido matricoje. Dėl aukštos darbinės temperatūros, kuri yra maždaug 650°C, kaip katalizatoriai nenaudojami taurieji metalai (sumažėja kuro elemento kaina).

Išlydyto karbonato kuro elementus naudojant kartu su turbina pasiekimas 65 % naudingumo koeficientas elektros energijos gamybai ir apie 85 % bendras naudingumo

koeficientas, kogeneracijos atveju. Lyginant su fosforo rūgšties kuro elementais, kurių efektyvumas 37% - 43% gaminant elektros energiją, MCFC yra efektyvesni.

Lyginant su šarminiais, fosforo rūgšties ir PEM kuro elementais, išlydyto karbonato kuro elementams nereikia naudoti išorinio reformerio gamtinių dujų ir biodujų konvertavimui į vandenilį. Esant aukštai darbinei temperatūrai angliavandenilinis kuras konvertuojamas į vandenilį pačiame kuro elemente, vyksta vidinis reformavimas. Tai sumažina šio kuro elemento kainą. Pagrindinis MCFC technologijos trūkumas yra mažas patvarumas. Dėl aukštos darbinės temperatūros ir dėl naudojamo koroziją sukeliančio elektrolito, elementas greičiau vyksta korozija ir trumpėja jo tarnavimo laikas. Šiuo metu tiriamos naujos korozijai atsparios medžiagos leisiančios ir kuro elemento dizainas, tai leistų kuro elemento dabartinį tarnavimo laiką ( 5 metai ) padvigubinti, nesumažinant efektyvumo [22, 23]

#### **1.4.4 Fosforo rūgšties kuro elementai (PAFC)**

Fosforo rūgšties kuro elementuose PAFC, kaip elektrolitas naudojama skysta fosforo rūgštis. Šiuose kuro elementuose elektrolitas patalpintas į teflonu surištą silikono karbito matricą ir naudojami anglies elektrodai su platininiu katalizatoriumi.

PAFC tipo kuro elementai dažniausiai naudojami nejudančiuose objektuose, tačiau yra panaudojimo atvejų didelėms transporto priemonėms, tokioms kaip autobusai. Šie kuro elementai vieni iš labiausiai subrendusių elementų tipų ir laikomi pirmaisiais moderniais kuro elementais.

Tai pat PAFC nėra tokie jautrūs anglies monoksidui, kaip PEM kuro elementai. Todėl fosforo rūgšties elementuose galima naudoti ne tokį gryną vandenilį, išgautą iš iškastinio kuro. Fosforo rūgšties elementus naudojant kogeneracijoje pasiekama apie 85 % naudingumo koeficientas. Tačiau gaminant vien elektros energija šis efektyvumas yra mažesnis tik 37 % - 42 %. Tai pat šie kuro elementai turi prastą svorio/galios santykį. Lyginant su kitais kuro elementais PAFC yra dideli ir sunkūs. Fosforo rūgšties kuro elementams reikia sunaudoti žymiai daugiau platinos, nei kitiems kuro elementams, todėl tai stipriai padidina PAFC kainą [22, 23]

#### **1.4.5 Šarminiai kuro elementai (AFC)**

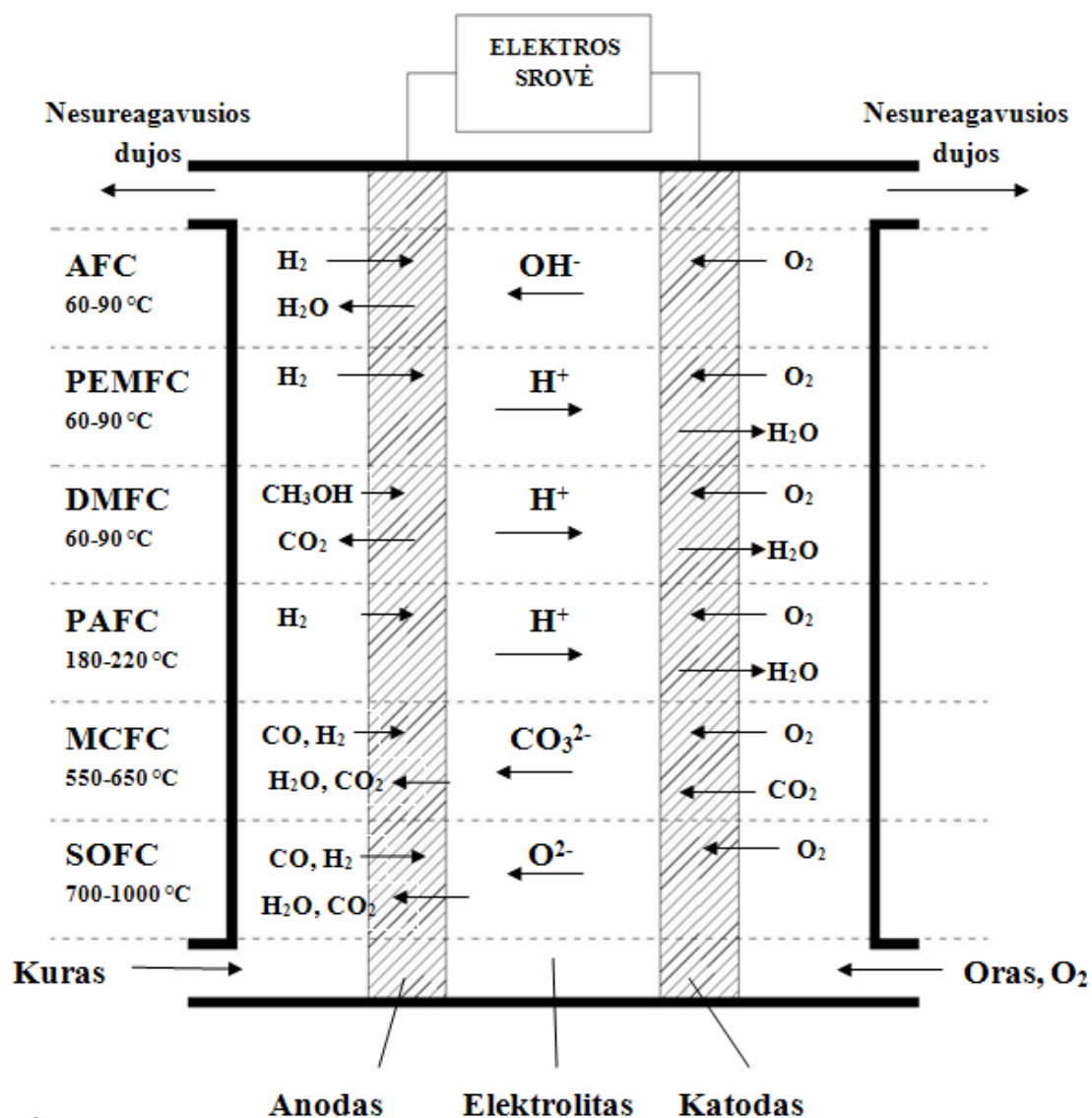
Šarminiai kuro elementai buvo viena iš pirmųjų sukurtų kuro elementų technologijų. Šio tipo kuro elementai buvo palčiai naudojami JAV kosmoso programoje, elektros energijos ir vandens gavimui kosminiuose laivuose. Šiose kuro elementuose naudojamas kalio hidroksido ir vandens tirpalo elektrolitas ir įvairių nebrangiųjų metalų katalizatorius anode ir katode.

Nesenai buvo pagamintas naujas AFC kuro elementas, kuris naudoja polimero membranos elektrolitą. Šie kuro elementai panašūs į PEM kuro elementus, bet skiriasi tuo, kad naudojama ne rūgštinė, o šarminė membrana. Kosmoso programoje šie kuro elementai pasiekė 60% efektyvumą.

Pagrindinis šio kuro elemento trūkumas - jautrumas anglies dioksidui ( $\text{CO}_2$ ). Net mažas anglies dioksido kiekis ore skatina karbonato susidarymą, tai gali stipriai sumažinti kuro elemento efektyvų veikimą ir patvarumą. Šarminiai kuro elementai su skystais elektrolitais, gali veikti recirkuliaciniu režimu, kurio dėka elektrolitas regeneruojamas ir taip sumažinamas karbonato formavimasis elektrolite. Skystų elektrolitų sistemose kyla problemų dėl sistemos drėkinimo, korozijos ir slėgių skirtumų. Iššūkiai šiai technologijai yra padidinti atsparumą anglies dioksidui, padidinti membranos laidumą ir ilgaamžiškumą, padidinti darbinę temperatūrą ir padidinti galios tankį [22, 23].

#### **1.4.6 Kuro elemento parinkimas**

. Visi analizuoti kuro elementai ir jų savybės pateiktos 1 lentelėje. Iš visų šių kuro elementų tipų kogeneracijai dažniausiai taikomi aukštos darbinės temperatūros ( $500 - 1000^\circ\text{C}$ ) kieto oksido (SOFC) ir žemos darbinės temperatūros ( $80^\circ\text{C}$ ) polimero elektrolito (PEM) kuro elementai. Kieto oksido kuro elementai gali naudoti įvairių angliavandenilį kurą, kai polimero elektrolito kuro elementai turi naudoti švarų  $\text{H}_2$  (mažiau nei 10 ppm CO). Tačiau SOFC turi mažesnę galios tankį ir ilgesnį paleidimo laiką, nei PEM. Kieto kuro oksido elementų sistemose pastatams šilumą paimama tik iš degimo kameros išmetamųjų dujų. Polimero oksido kuro elementų sistema turi privalumą - du šilumos srautai: žemos temperatūros vėsinimo vanduo iš kuro elemento ir aukštos temperatūros išmetamosios dujos iš degimo kameros



13 pav. Kuro elementuose vykstančios reakcijos [23]

1 lentelė. Kuro elementų savybės [22]

Kuro elemento rūšis	PEFC (Polimero protonų mainų membranos)	AFC (Šarminis)	PAFC (Fosforo rūgštis)	MCFC (Išlydyto karbonato)	SOFC (Kieto oksido)
Elektrolitas	Rūgštinė kieta protonų mainų membrana	Kalio hidroksidas (KOH)	Fosforo rūgštis	Išlydyti šarminiai karbonatai	Keramika

Elektrodas	Korėta anglis	Metalai	Korėta anglis arba grafitas	Nikelis arba nikelio oksidas	Keramika
Katalizatoriai	Platina	Nikelis, metalų oksidai arba taurieji metalai	Platina	Elektrodo medžiaga	Elektrodo medžiaga
Jungčių medžiaga	Anglis arba metalai	Metalai	Grafitas	Nikelis arba nerūdijantis plienas	Nikelis, keramika arba nerūdijantis plienas
Pirminė kuro elemento medžiaga	Anglis	Anglis	Grafitas	Nerūdijantis plienas	Keramika
Laisvasis jonas	H <sup>+</sup>	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>=</sup>	O <sup>=</sup>
Veikimo temperatūra	60-100 °C	50-220 °C	200-220°C	600-700°C	500-1000°C
Elektrolitui kenksmingos medžiagos	CO	CO, CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S	CO, H <sub>2</sub> S	H <sub>2</sub> S	H <sub>2</sub> S
Vidinis kuro reformavimas	Ne	Ne	Ne	Taip	Taip
Panaudojimas	Transporto priemonės, mažoji kogeneracija	Kosminiai laivai	Vidutinio dydžio kogeneracinės sistemos	Vidutinio ir didelio dydžio kogeneracinės, hibridinės sistemos	Įvairių dydžių autonominės, kogeneracinės ir hibridinės sistemos

Polimero elektrolito kuro elementai gamina elektros energija ir šilumą, kuri vėliau gali būti panaudojama pastato šildymo sistemos vandeniui šildyti. Tai pasiekama naudojant tradicinę vandens šildymo sistemą su rezervuaru šiltam vandeniui namų reikmėms. Pagrindinis tikslas kuro ruošimo metu - į sistemą tiekiamas gamtines dujas, paversti aukštos koncentracijos vandenilio ir mažos koncentracijos anglies dioksido dujų mišinių. Endoterminių reakcijų palaikymui reformatoriuje reikalinga šiluma, kuri tiekama iš degimo kameros. Į degimo kamerą tiekiamos išmetamosios dujos iš kuro elemento anodo ir reikalui esant sumaišomos su gamtinėmis dujomis iš dujotiekio [12].

SOFC yra universalūs kuro elementai, kuriuose gali būti vartojamas įvairus kuras. Esant aukštai darbinei temperatūrai angliavandenilinis kuras gali būti tiesiogiai panaudojamas. Ruošiant dujinį kurą tinkamai reakcijai prie anodo, stengiamasi pašalinti komponentus galinčius

reaguoti su katalizatoriumi, kas blogina katalizatoriaus veikimą. Naudojant CH<sub>4</sub> dujas ir verčiant jas į vandenilį naudojamas garo reformavimas, ši katalizatoriaus reakcija vyksta kuro elemento anodo dalyje arba atskirame garo reformatoriuje sumontuotame kuro elemente. Naudojant atskirą garo reformatorių pasiekiamas didesnis naudingumas ir mažesnis sistemos sudėtingumas, bet tai reikalauja papildomų investicijų

#### 1.4.7 Kuro paruošimas

Maždaug 48 % pasaulyje pagaminamo vandenilio gaunama garu reformuojant gamtines dujas, 30 % perdirbant žalios naftos produktus, 18 % perdirbant akmens anglį ir 3 % kaip šalutinis chloro šarmo produktas.

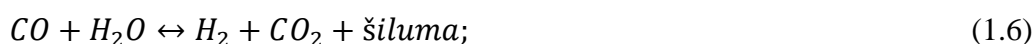
Gamtinių dujų reformavimas dažniausiai naudojamas procesas. Perdirbimo efektyvumas priklauso nuo pagaminto garo panaudojimo po proceso. Panaudojant susidariusį aukštų parametrų garą pasiekiamas 89 % perdirbimo efektyvumas, nepanaudojant 70% [26].

Šio proceso metu, reaguoja garų būsenos angliavandenilinis kuras su perkaitintu garu, gaunamas vandenilis ir anglies monoksidas. Norint padidinti vandenilio koncentraciją, CO dalyvauja vandens – dujų pakeitimo reakcijoje, kur reaguoja anglies monoksidas ir vanduo, sudarydami vandenilį ir anglies dioksidą. Gaminant vandenilį garo reformavimo metodu, gaunamas aukščiausias efektyvumas ir didžiausia vandenilio koncentracija.

Garų reformavimo reakcija [27]:



Vandens – dujų pakeitimo reakcija:



Nors vandens – dujų pakeitimo reakcija yra egzoterminė, bet garo reformavimo reakcija endoterminė ir bendrai šis procesas – endoterminis. Reikiama šiluma gali būti tiekiamą iš kuro elemento arba iš degimo kameros, kurioje sudeginamos nepilnai sureagavusios išmetamosios dujos.

Svarbu tiekti reikiamą garo kiekį, tiekiant per didelį garo kiekį garo reformavimo procese gali pradėti formotis anglis [27]:

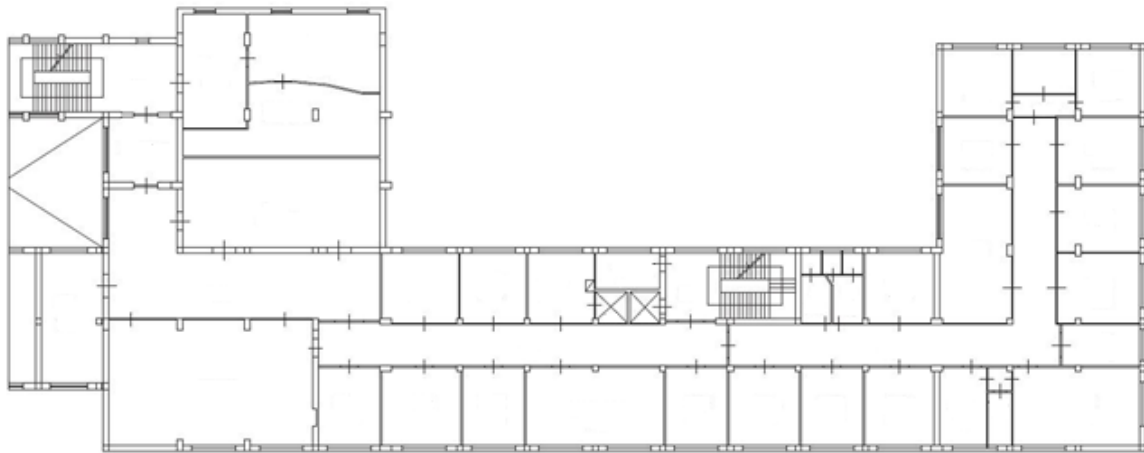




## 2 Analizuojamas pritaikymo atvejis

### 2.1 Objekto parinkimas

Norint parinkti kogeneracinės sistemos, įrenginius reikia, žinoti kokiam vartotojui ir kokiame objekte bus pritaikoma ši sistema. Nagrinėjama atvejui parenkamas biuro pastatas. Parinktas biuro paskirties pastatas yra 3 aukštų, 2700 m<sup>2</sup> ploto [28]. Pastatas naujos statybos, B energetinio efektyvumo.



14 pav. Pastato schema [28]

### 2.2 Pastato energijos poreikiai

Įvertinami pasirinkto pastato šilumos ir elektros energijos poreikiai

#### 2.2.1 Šiluminės energijos poreikiai

Remiantis straipsnyje [28] pateiktais šilumos poreikių (įvertinat ventiliacijos šilumos nuostolius, pritekėjimus iš išorės ir vidinius šilumos išsiskyrimus) biuro pastatams įvairiuose Europos šalyse duomenimis ir skaičiavimo metodika, koreliacijos būdu apskaičiuojami metiniai pastato šilumos poreikiai Lietuvos klimatui:

$$Q_{met} = 29,329 \ln(DL) - 192,65; \quad (2.1)$$

čia: DL - vidutinis šildymo sezono dienolaispnių skaičius Kauno mieste

Šildymo sezono dienolaispniai Kauno miestui apskaičiuojami iš [30]:

$$\Sigma DL = (18 - t_{i\check{s}}) \cdot z; \quad (2.2)$$



čia:  $t_{i\bar{s}}$  - vidutinė Kauno miesto šildymo sezono temperatūra [29],  $z$  – šildymo sezono dienų skaičius [29]

$$\Sigma DL = (18 - 0,7) \cdot 219 = 3789;$$

Apskaičiuojami pastato šilumos poreikiai:

$$Q_{\bar{s}s} = 60,441 \ln(3789) - 421,08 = 76,95 \frac{kWh}{m^2};$$

Apskaičiuojamas metinis šilumos poreikis 2700 m<sup>2</sup> ploto pastatui:

$$Q = 2700 \cdot Q_{\bar{s}s} = 2700 \cdot 76,95 = 207765 kWh;$$

Pastato galia šildymui:

$$Q_{\bar{s}ild}^{vid} = \frac{Q}{z \cdot 24}; \quad (2.3)$$

čia:  $Q$  - metinis šilumos poreikis šildymui

Apskaičiuojama pastato galia šildymui:

$$Q_{\bar{s}ild}^{vid} = \frac{207765}{219 \cdot 24} = 39,53 kW;$$

Maksimali šilumos galia šildymui:

$$Q_{\bar{s}ild}^{max} = Q_{\bar{s}ild}^{vid} \frac{t_v - t_{ex}^{sk}}{t_v - t_{i\bar{s}}}; \quad (2.4)$$

čia:  $t_v$  – pastato vidaus temperatūra,  $t_{ex}^{sk}$  – skaičiuotina šildymo sezono lauko oro temperatūra [29],  $t_{i\bar{s}}$  - vidutinė šildymo sezono lauko oro temperatūra.

Apskaičiuojama maksimali šilumos galia šildymui:

$$Q_{\bar{s}ild}^{max} = 39,53 \frac{18 + 22}{18 - 0,7} = 91,40 kW;$$

## 2.2.2 Energijos sąnaudos karštam vandeniui

Energijos sąnaudos skaičiuojamos pagal [31] literatūros metodiką. Karšto vandens poreikis skaičiuojamas atsižvelgiant į žmonių skaičių, kiek valandų per dieną ir kiek dienų per metus reikalingas karštas vanduo. Biuro pastatui karšto vandens poreikis apskaičiuojamas:

$$Q_{kv} = \frac{1,2 \cdot m \cdot a \cdot c \cdot (t_{kv} - t_{vv})}{3600 \cdot n}; \quad (2.5)$$

čia:  $m$  – žmonių skaičius;  $a$  – karšto vandens norma litrai per parą vienam žmogui;  $c$  – vandens specifinė šiluma kJ/kgK;  $t_{kv}$  – karšto vandens temperatūra, °C;  $t_{vv}$  - vandentiekio vandens temperatūra, °C.

Žmonių skaičius biuro pastate priimamas 70. Visuomeniniuose pastatuose vandens norma per parą  $a = 25$  l/žmogui. Vandens specifinė šiluma  $c = 4,2$  kJ/kgK. Karšto ir

vandentiekio vandens temperatūros  $t_{kv} = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$  ir  $t_{vv} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Imamas 8 val per dieną karšto vandens poreikis.

Karšto vandens poreikiai apskaičiuojami:

$$Q_{kv} = \frac{1,2 \cdot 70 \cdot 25 \cdot 4,2(55 - 10)}{3600 \cdot 8} = 13,78 \text{ kW};$$

Karšto vandens poreikis šildymo sezono metu:

$$Q_{kvm} = Q_{kv} \cdot 12 \cdot 252 = 13,78 \cdot 12 \cdot 219 = 36,22 \frac{\text{MWh}}{\text{metus}};$$

### 2.2.2.1 Elektros energijos poreikis

Pagal „EL – TERTIARY“ surinktus duomenis, 51 Europos biuro pastatų, mažai elektros energijos naudojantiems biuro pastatams, priimamas vidutinis metinis elektros energijos poreikis yra  $55 \text{ kWh/m}^2$  per metus [32]. Taigi metinis elektros energijos poreikis pasirinktam  $2700 \text{ m}^2$  pastatui yra:

$$P_{past} = 2700 \cdot 55 = 148,5 \frac{\text{MWh}}{\text{metus}};$$

Pastato elektros energijos galia:

$$P' = \frac{148500}{365 \cdot 24} = 16,95 \text{ kW};$$

Elektros energijos poreikis per šildymo sezoną:

$$P_{šild} = P' \cdot 12 \cdot 219 = 16,95 \cdot 24 \cdot 219 = 89,09 \frac{\text{MWh}}{\text{šild. s}}$$

**2 lentelė.** Pastato energijos poreikiai

Pastato energijos poreikiai	Galia, kW	Suvartotas energijos kiekis per šildymo sezoną, MW/h
Šiluminės energijos poreikis	39,53	207,765
Karšto vandens poreikis	13,78	36,22
Elektros energijos poreikis	16,95	89,09

## 3 Įrangos galios parinkimas pastato energetiniams poreikiams tenkinti

Priimama, kad nėra galimybės šiam pastatui tiekti šilumos energijos centralizuotu būdu iš šilumos tinklų. Šiam pastatui yra galimybė tiekti dujas iš dujotiekio ir elektros energiją iš skirstomųjų elektros tinklų. Todėl kaip pirminis variantas pastato energetiniam aprūpinimui

pasirenkamas: dujų katilas - pastato šilumos poreikiams tenkinti ir elektros energijos tiekimas iš skirstomųjų elektros tinklų.

### 3.1 Dujinis katilas

Apskaičiuota maksimali pastato šildymo galia pagal projektinę temperatūrą  $Q_{šild}^{max} = 91,40 \text{ kW}$  ir galia karšto vandens ruošimui  $Q_{kv} = 13,78 \text{ kW}$ . Tada pastato šildymo galia:

$$Q_{Past}^{max} = Q_{šild}^{max} + Q_{kv} = 91,40 + 13,78 = 105,18 \text{ kW};$$

Parenkant katilo galingumą įvertinamas katilo naudingumo koeficientas ir 10 % atsarga:

$$Q_{kat} = Q_{past}^{max} \cdot 1,1 = 105,18 = 115,7 \text{ kW};$$

Iš katalogo [33] parenkami dujinis katilas Sime RS 129 MK II.

#### 3 lentelė. Parinkto katilo duomenys

Katilo modelis	Sime RS 129 MK II
Galia, kW	129
Naudingumo koef., %	88
Degimo produktų temperatūra, °C	129

Apskaičiuojamas pagaminamas nominalus šilumos kiekis:

$$Q = Q_{kat} \cdot 219 \cdot 24 = 129 \cdot 219 \cdot 24 = 678,02 \frac{MWh}{šild. s}$$

Apskaičiuojamas dujinio kuro suvartojimas pagal [46] metodiką:

$$B = \frac{Q_{kat}}{Q_d^{\checkmark} \cdot \eta_k};$$

čia: gamtinių dujų šilumingumas  $Q_d^{\checkmark} = 10,673 \text{ kWh/m}^3$  parenkamas iš [34].

$$B = \frac{129}{10,67 \cdot 0,88} = 13,74 \frac{m^3}{h}.$$

### 3.2 Mikroturbinos galios parinkimas

Priimama, kad mikroturbinos galia parenkama pagal reikiamą šilumos poreikį, o elektrinės galios perteklius bus parduodamas į elektros tinklus.

#### 3.2.1 Šiluminė galia

Iš gamintojų katalogo [30] parenkama 65 kW elektrinės galios mikroturbina „Capstone“ C65, kurios gamintojų nurodyta šiluminė galia apie 120 kW. Mikroturbina naudojama pastato šiluminės energijos ir elektros energijos poreikiams tenkinti. Šiluma šilumokaičiui perduodama su išmetamosiomis mikroturbinos dujomis. Remiantis duomenimis literatūroje [35] mikroturbinei dirbant pilnu pajėgumu, šilumokaityje sugražinama 54,3% sunaudoto kuro energijos šiluminės energijos forma. Šilumokaityje sugražintos šiluminės energijos galia:

$$P_{\text{šil}} = P_{\text{kuro}} \cdot \eta_{\text{šg}} = 224 \cdot 0,543 = 121,63 \text{ kW};$$

Mikroturbinos sunaudojamo kuro galia:

$$P_{\text{kuro}} = \frac{P_{\text{mt}}}{\eta} = \frac{65}{0,29} = 224,0 \text{ kW};$$

Bendras mikroturbinos naudingumas apskaičiuojamas:

$$\eta = \frac{P_{\text{el}} + P_{\text{šil}}}{P_{\text{kuro}}} \cdot 100\% = \frac{65 + 121,63}{224,0} \cdot 100\% = 83,33\%;$$

Mikroturbinoje sunaudojamas kuro kiekis:

$$B = \frac{P_{\text{kuro}}}{Q_{\text{d}}^{\text{ž}} \cdot \eta_{\text{kiš}}} = \frac{224,0}{10,67 \cdot 0,833} = 25,20 \frac{\text{m}^3}{\text{h}};$$

### 3.2.2 Elektrinė galia

Mikroturbinos turi patenkinti pastato elektros energijos poreikius. Vienodos galios mikroturbinų skaičius nustatomas pagal skaičiavimą:

$$n = \frac{P'}{P}; \quad (3.1)$$

čia  $n$  – reikiamų turbinų skaičius,  $P'$  - pastato elektros energijos galia kW,  $P$  – elektrinė mikroturbinos galia kW

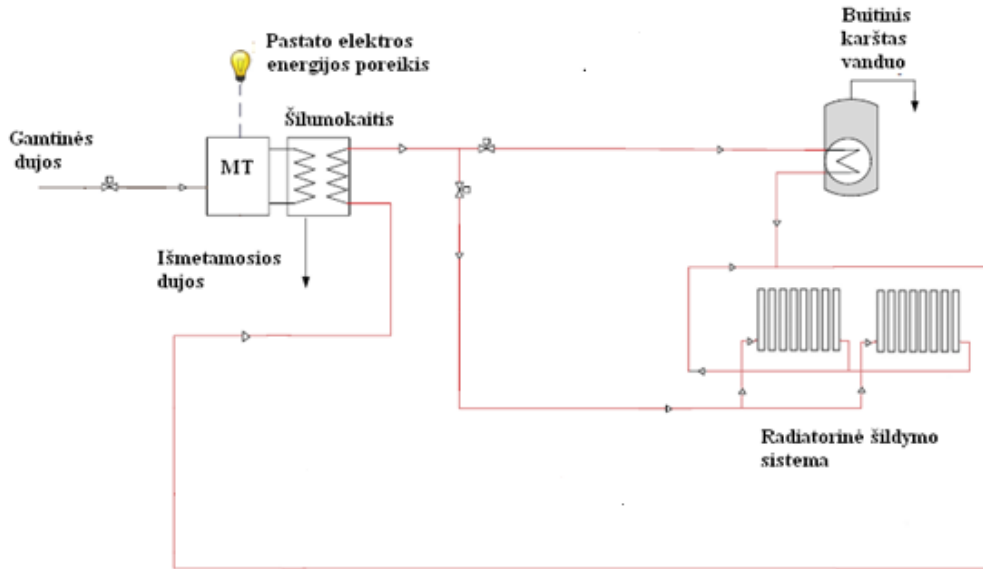
Apskaičiuojamas reikiamas mikroturbinų kiekis

$$n = \frac{P'}{P} = \frac{16,95}{65} = 0,29.$$

Parinkta turbina C65 pilnai tenkina pastato elektros poreikius. Naudojant mikroturbiną pilnai padengiami pastato šiluminės energijos poreikiai ir gaunama perteklinė elektros energijos galia. Priimama, kad perteklinę elektros energiją bus paduodama elektros tinklams.

**4 lentelė.** Sistemos Nr. 1 suvartojamas kuras, šiluminė galia ir elektrinė galia

Sunaudojamas gamtinių dujų kiekis, m <sup>3</sup> /h	25,20
Šiluminė galia, kW	121,63
Elektrinė galia, kW	65



15 pav. Mikroturbinos kogeneracinės sistemos schema [13]

### 3.3 Kuro elemento galios parinkimas

Kuro elemente pagaminamas šilumos kiekis apskaičiuojamas naudojant skaičiavimo metodiką [37]:

$$Q = P_e \cdot \left( \frac{1,25}{V} - 1 \right), kW; \quad (3.2)$$

Formulė pertvarkoma :

$$P_e = \frac{Q}{\left( \frac{1,25}{V} - 1 \right)}, kW; \quad (3.3)$$

Kuro elemento galia apskaičiuojama pagal pastato šildymo galia, kuri priimama  $Q = 120 kW$ :

$$P_e = \frac{Q}{\left( \frac{1,25}{V} - 1 \right)} = \frac{120}{\left( \frac{1,25}{0,65} - 1 \right)} = 130,0 kW;$$

Parinkamas 135 kW galios kuro elementų modulis. Šį modulį sudaro 9 vnt. 15 kW galios kuro elementų junginiai sudaryti iš 96 vnt. kuro elementų plokštelių [36].

#### 3.3.1 Kuro elemente sunaudojamas vandenilio kiekis

Naudojant skaičiavimo metodiką [35] apskaičiuojamas reikiamas vandenilio kiekis:

$$Q_H = \frac{2,02 \cdot 10^{-3} \cdot P_e}{2 \cdot V \cdot F}; \quad (3.4)$$

čia:  $P_e$  - kuro elemento elektrinė galia;  $V$  - įtampa kuro elemente  $V = 0,65 \text{ V}$  iš [35];  $F$  - faradėjaus skaičius,  $C/mol$ ;  $2,02 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$  - vandenilio molinė masė.

Apskaičiuojamas reikiamas vandenilio kiekis:

$$Q_H = \frac{2,02 \cdot 10^{-3} \cdot 135000}{2 \cdot 0,65 \cdot 96487} = 0,002174 \frac{\text{kg}}{\text{s}};$$

**5 lentelė.** Kuro elemento kuro suvartojimas

	Skysta būsena	Dujinė būsena
Vandenilio tankis	70,8 kg/m <sup>3</sup>	0,08987 kg/m <sup>3</sup>
Kuro suvartojimas	1,74 kg/h	87,12 m <sup>3</sup> /h

### 3.3.2 Reikiamas gamtinių dujų kiekis

Apskaičiuojama reikiama kuro galia 135 kW kuro elementui:

$$P_{kuro} = \frac{P_{ke}}{\eta_{ke}} = \frac{135}{0,468} = 288,46 \text{ kW};$$

kur  $\eta_{ke}$  - kuro elemento naudingumo koeficientas apskaičiuojamas naudojant formulę:

$$\eta_{ke} = \mu_{kp} \cdot \frac{0,65}{1,25} \cdot 100 \%;$$

čia:  $\mu_{kp}$  - kuro elemento kuro išnaudojimo koeficientas, priimamas 0,90 [35]

Apskaičiuojamas kuro elemento naudingumo koeficientas:

$$\eta_{ke} = 0,90 \cdot \frac{0,65}{1,25} \cdot 100\% = 46,8 \%;$$

Gamtinių dujų šilumingumas  $Q_d^{\ddot{z}} = 10,673 \text{ kWh/m}^3$  parenkamas iš [41].

Apskaičiuojamas reikiamas gamtinių dujų kiekis:

$$q_{dujų} = \frac{P_{kuro}}{Q_d^{\ddot{z}} \cdot \eta_{kiš}} = \frac{288,46}{10,67 \cdot 0,90} = 30,04 \frac{\text{m}^3}{\text{h}};$$

### 3.3.3 Reikiamas oro kiekis

Veikiant kuro elementui kiekvienam deguonies moliui tenka 4 elektronai.

$$O_2 = \frac{P_e}{4 \cdot V \cdot F}, \frac{\text{moliai}}{\text{s}}; \quad (3.5)$$

Norint gauti kg/s, formulė pertvarkoma:

$$O_2 = \frac{32 \cdot 10^3 P_e}{4 \cdot V \cdot F}, \frac{kg}{s}; \quad (3.6)$$

Oro ir deguonies molinis santykis 0,21 ir oro molinė masė yra  $28,97 \cdot 10^{-3} kg/mol$ , tada oro suvartojimas apskaičiuojamas:

$$Orosuvtuojimas = \frac{28,97 \cdot 10^{-3} \cdot P_e \cdot \lambda}{0,21 \cdot 4 \cdot V \cdot F}, kg/s;$$

čia:  $\lambda$ - stochiometrinis vandenilio ir deguonies santykis,

$$Orosuvtuojimas = \frac{28,97 \cdot 10^{-3} \cdot 135000 \cdot 2}{0,21 \cdot 4 \cdot 0,65 \cdot 96487} = 0,148 kg/s$$

Gautas reikalingas oro kiekis yra 0,148 kg/s arba 532,8 kg/h. Esant normalioms sąlygoms suvartojamo oro kiekis bus  $3233,6 m^3/h$ .

### 3.3.4 Išsiskyrusio vandens kiekis

Vandens molinė masė  $18,02 \cdot 10^{-3} kg/mol$

$$H_2O = \frac{18,02 \cdot 10^{-3} \cdot P_e}{2 \cdot V \cdot F} = \frac{18,02 \cdot 10^{-3} \cdot 135000}{2 \cdot 0,65 \cdot 96487} = 0,019 \frac{kg}{s};$$

Gautas vandens kiekis kuro elemente 68,4 kg/h litrai.

Naudojant kuro elementą pilnai padengiami pastato šilumos energijos poreikiai ir pilnai padengiami elektros energijos poreikiai. Priimama, kad elektros energijos perteklius bus parduotas į tinklus.

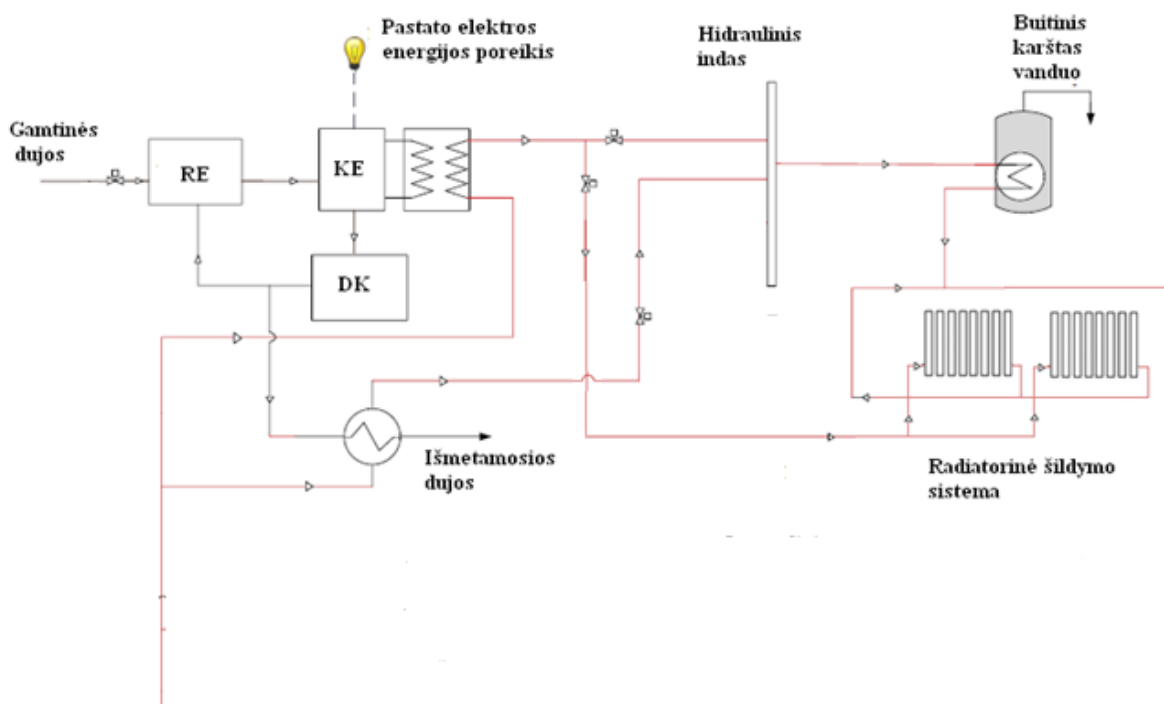
### 3.3.5 Šiluminė galia

Perskaičiuojama šiluminė galia parinktam 135 kW kuro elementui:

$$Q = 135000 \cdot \left( \frac{1,25}{0,65} - 1 \right) = 124,6 kW;$$

**6 lentelė.** Sistemos Nr. 2 suvartojamas kuras, šiluminė galia ir elektrinė galia

Sunaudojamas gamtinių dujų kiekis, m <sup>3</sup> /h	30,04
Šiluminė galia, kW	124,6
Elektrinė galia, kW	135



16 pav. Kuro elemento kogeneracinė sistemos schema [13]

Pateikiamas gautų skaičiavimų apibendrinimas

7 lentelė. Skaičiavimų duomenys sistemoms dirbant nominaliu režimu

		Sistema Nr.1 Mikroturbi na	Sistema Nr. 2 Kuro elementas	Esama sistema Dujinis katilas 129 kW
Sunaudoja mas kuras, m <sup>3</sup>	Per valandą	25,20	30,04	13,74
	Per šildymo sezoną	132451	157890	72218
Pagamina elektros energija	kWh	65	135	-
	Per šildymo sezoną, MWh	341,64	709,56	-
Pagamina šilumos energija	kWh	121,63	124,6	129
	Per šildymo sezoną, MWh	639,29	651,11	687,02
Elektrinis naudingumo koeficientas, %		29	46,8	-
Šiluminis naudingumo koeficientas, %		54,3	43,2	88,0
Bendras naudingumo koeficientas, %		83,33	90,0	-



## 4 Ekonominiai skaičiavimai

Atliekant ekonominius skaičiavimus apytiksliai įvertinama reikiamų investicijų suma. Į šią sumą įeina reikiamų medžiagų, įtaisų ir atliktų darbų kaina. Taip pat atliekami skaičiavimai išlaidų palyginimui, kurios reikalingos aprūpinti biuro pastatą šilumos ir elektros energija, pritaikant skirtingus energijos šaltinius.

### 4.1 Investicijos

Iš [38] parenkami kogeneracinių mikroturbinų ir kuro elementų sistemų įrengimo kainų vidurkiai.

**8 lentelė.** Reikiamos investicijos įrangai įrengti

Investicijos įrangos įrengimui	Mikroturbina	Kuro elementas
Eurai/kW	3037	5136
Sistemos galia, kW	65	135
Eurai	197405	693360

### 4.2 Išlaidos gamybai

Apskaičiuojamos planuojamų įrengti mikroturbinos ir kuro elemento sistemų finansinių išteklių sąnaudos reikalingos elektros ir šiluminei energijai gaminti šildymo sezono metu. Gautos finansinių išteklių sąnaudos lyginamos su esamos sistemos dujinių katilų finansinėmis sąnaudomis šiluminei energijai gaminti, bei elektros energijos iš skirstomųjų tinklų finansinėmis sąnaudomis. Atliekant palyginimą, kaip reikiamas pagaminti šiluminės energijos kiekis, priimamas nominalus sistemos Nr. 1 pagaminamas šilumos kiekis per šildymo sezoną  $Q_{past} = 639,29 MWh$ .

Dujų kaina iš [49] 3 grupės vartotojams yra 0,41 Eur/m<sup>3</sup> ir 3,99 Eur mėnesinis mokestis. Metinės išlaidos kurui apskaičiuojamos:

$$E = \frac{K}{Q_d^z \cdot \eta}; \quad (4.1)$$

čia:  $K$  - kuro kaina Eur/kWh;  $Q_d^z$  – dujų žemutinis šilumingumas, kWh/m<sup>3</sup>; įrenginio šiluminis naudingumo koeficientas  $\eta$

Apskaičiuojama mikroturbinos pagaminamos šilumos energijos kaina:

$$E = \frac{0,41}{10,67 \cdot 0,543} = 0,071 \text{ Eur}/kWh;$$

Šildymo sezono išlaidos kurui apskaičiuojamos naudojant formulę:

$$I_k = Q_{mt} \cdot E_{MWh} + n \cdot E_{m\acute{e}n};$$

Čia:  $Q_e$ - mikrotubinoje pagaminama šilumos energija šildymo sezono metu, MWh;  $E_{MWh}$  - 1 MWh kaina, naudojant gamtines dujas mikroturbinoje, Eur/MWh;  $n$  - šildymo sezono mėnesių skaičius;  $E_{m\acute{e}n}$ - mėnesinis tarifas, Eur.

Apskaičiuojamos išlaidos per šildymo sezoną naudojant mikroturbiną:

$$I_k = 319,67 \cdot 71 + 8 \cdot 3,99 = 22729 \text{ Eur}.$$

**9 lentelė.** Sistemų pagaminama šiluminė energija ir išlaidos jai pagaminti

	Sistema Nr.1	Sistema Nr. 2	Esama sistema
	Mikro turbina	Kuro elementas	Dujinis katilas
Per šildymo sezoną pagamina šilumos energija, MWh	639,29		
Šiluminės energijos kaina, Eur/kWh	0,071	0,089	0,043
Išlaidos kurui, Eur	45271	56895	27947

### 4.3 Elektros energijos kaina

Pirminėje sistemoje elektros energija tiekama iš skirstomųjų elektros tinklų. Todėl norint palyginti sistemų finansinių išteklių sąnaudas, reikia įvertinti sunaudotos elektros energijos kainą. Elektros energijos kaina iš [47] vienos laiko zonos mėnesinis tarifas verslui  $E_{kWh} = 0,020 \text{ Eur/kWh}$  ir galios dedamoji  $E_t = 0,57 \text{ Eur/kW/m\acute{e}n}$ .

Išlaidos elektros energijos tiekimui iš elektros tinklų per šildymo sezoną apskaičiuojamos naudojant formulę:

$$I_{el}^{\acute{s}.s} = P_{\acute{s}ild} \cdot E_{kWh} + E_t \cdot P_{el}; \quad (4.2)$$

čia:  $P_{\acute{s}ild}$ - elektros energija pagaminta per šildymo sezoną, kWh;  $E_{kWh}$  - elektros energijos kaina, Eur/kWh.

Išlaidos elektros energijai per šildymo sezoną apskaičiuojamos:

$$I_{el}^{\acute{s}.s} = (89090 \cdot 0,02 + 0,57 + 16,95) \cdot 1,21 = 2168 \text{ Eur};$$

### 4.4 Elektros energijos pertekliaus pardavimas elektros tinklams

Veikiant sistemoms Nr. 1 ir sistemai Nr. 2 pastato šilumos poreikiai patenkinami, bet gaunamas didelis kiekis perteklinės elektros energijos, kuri galima parduoti elektros tinklams.

**10 lentelė** Elektros energijos kiekiai šildymo sezono metu

	Mikroturbina	Kuro elementas
Nominalus pagaminamas elektros energijos kiekis, MWh	341,64	709,56
Perskaičiuotas pagaminamas elektros energijos kiekis prie nustatyto pagaminamo šilumos kiekio	341,64	692,56
Pastato elektros energijos poreikis	89,09	
Perteklinės elektros energijos kiekis	252,55	603,47

Iš [47] parenkamas  $10 \text{ kW} < \text{IG} \leq 350 \text{ kW}$  Maksimalus tarifas iš 0,066 Eur/kWh

Apskaičiuojama suma pardavus perteklinę elektros energiją naudojant mikroturbiną:

$$I_{\text{pard}} = 252550 \cdot 0,066 = 16668 \text{ Eur};$$

Apskaičiuojama suma pardavus perteklinę elektros energiją naudojant kuro elementą:

$$I_{\text{pard}} = 603470 \cdot 0,066 = 39829 \text{ Eur}.$$

#### 4.5 Gamybinių išlaidų palyginimas ir atsipirkimas

Veikiant esamai sistemai nominaliu galingumu, išlaidos kurui pastato šildymui yra 27947 Eur ir išlaidos elektros energijai 2168 Eur per šildymo sezoną, bendrai 30115 Eur. Tokiam pačiam šiluminės energijos kiekiui pagaminti, naudojant sistemą Nr. 1 išlaidos kurui 24799 Eur, naudojant sistemą Nr. 2 išlaidos 16327 Eur.

**11 lentelė.** Sistemų išlaidų kurui palyginimas

	Esama sistema	Sistema Nr. 1	Sistema Nr. 2
Išlaidos elektros ir šiluminės energijos gamybai, Eur/šild.s	30115	45271	56895
Parduota elektros energija, Eur/šild.s	-	16668	39829
Sutaupymai lyginant su esama sistema, Eur/šild.s	-	1512	13049

## 4.6 Investicijų atsipirkimas

Investicijų atsipirkimas skaičiuojamas pagal:

$$A_i = \frac{I}{S_m}; \quad (4.3)$$

čia:  $I$  - investicijų dydis, Eur;  $S_m$  - sutaupymai per šildymo sezoną, Eur.

Apskaičiuojamas investicijų atsipirkimas šildymo sezono metu sistemai Nr. 1:

$$A_{mt} = \frac{197405}{1512} = 130,8 \sim 131 \text{ metai};$$

Investicijų atsipirkimas sistemai Nr. 2:

$$A_{ke} = \frac{693360}{13049} = 53,1 \sim 53 \text{ metai}$$

Sistemos Nr. 1 ir sistemos Nr. 2 atsipirkimas yra prastas – didelis atsipirkimo laikas. Pagrindiniai veiksniai lemiantys prastą atsipirkimą yra didelė įrangos kaina. SOFC kuro elemento tarnavimo laikas apie 40000 val., per metus kuro elementas veikia 5256 valandas. Gaunamas kuro elemento tarnavimo laikas 7,6 metų yra mažesnis už atsipirkimo laiką. Mikro turbinos tarnavimo laikas 40000-80000 valandų. Imant vidutinį 60 tūkst. val. tarnavimo laiką, mikroturbina dirbdama 5256 val. per metus, tarnautų 11 metų. Tiek kuro elementas, tiek mikroturbina susidėvėtų greičiau, nei būtų pasiektas atsipirkimas. Šių sistemų panaudojimas būtų ekonomiškėnis sumažėjus įrangos kainoms.

Norint, kad šiame darbe priimtomis sąlygomis analizuojama įranga atsipirktų, pradinės investicijos turi būti mažesnės. Pradinės investicijos kuro elementų kogeneracinėms sistemoms turėtų sumažėti iki 740 Eur/kW (atsipirkimas 7 metai) ir mikroturbinų kogeneracinėms sistemoms iki 233 Eur/kW (atsipirkimas 10 metų).

Šios technologijos atsipirktų, jei būtų skiriamos ES dotacijos. Atsiradus lengvatoms įsigyti šia įrangą padidėtų gamybos mastas, tai taip pat stipriai sumažintų pradinę įrenginio kainą. Šiuo metu matomas susidomėjimas mikrokogeneracinių sistemų naudojimu, vykdomas Europos komisijos „ene.field“ projektas, kuriame numatoma iki 2017 m. įrengti 1000 vnt. mikrokogeneracinių kuro elementų sistemų, pritaikytų gyvenamiesiems namams [1]. Taip pat projekte „CODE 2“ iki 2030 metų Europoje numatoma įrengti 1,7 mln. mikrokogeneracinių sistemų, kurių įrengimui bus skiriama ES parama.

## IŠVADOS

Išanalizavus mikroturbinos ir kuro elementų panaudojimą pastato energetinėms reikmėms tenkinti, daromos išvados:

1) Išanalizavus literatūrą apie kogeneracines sistemas, tolimesnei analizei buvo pasirinktas SOFC tipo kuro elementas, dėl mažų taršos normų, mažo jautrumo kuro kokybei ir aukšto elektrinio naudingumo koeficiento ir „Capstone” mikroturbina, dėl ilgo tarnavimo laiko, be periodinių priežiūros darbų, bei naudojamų orinių guolių ir orinio aušinimo sistemų.

2) SOFC tipo kuro elementas elektros energiją gamina dideliu efektyvumu 46,8 % ir lyginant su mikroturbina, kurios elektros energijos gamybos efektyvumas yra tik 29 %, yra efektyvesnis.

3) Gaminant elektros energiją ir išnaudojant atliekinę šilumą pastato šildymo reikmėms, SOFC tipo kuro elemento efektyvumas yra 90%, lyginant su mikroturbina, kurios bendras efektyvumas 83,3 %.

4) Vertinant sistemą ekonominiu aspektu, kai vietoj esamos dujinio katilo šildymo sistemos ir elektros naudojimo iš elektros tinklų. diegiamos pasirinktos technologijos, negaunamas atsipirkimo efektas, nes:

a) Pasirinktos technologijos reikalauja didelių investicijų.

b) Tenkinant pastato šilumos poreikius gaunami dideli kiekiai perteklinės elektros energijos, kurios pardavimas į elektros tinklus nėra palankus.

c) Trumpas SOFC kuro elemento įrangos tarnavimo laikas yra apie 7 metai, lyginant su mikroturbinos 11 metų tarnavimo laiku.

d) Nebuvo vertinama įrangos priežiūros dažnumas ir kaštai

5) Pagal esamas sąlygas sistema atsipirktų, jei pradinė kuro elementų kogeneracinės sistemos kaina būtų 740 Eur/kW (atsipirkimas 7 metai) ir mikroturbinų kogeneracinėms sistemoms iki 233 Eur/kW (atsipirkimas 10 metų).

6) Kogeneracinių kuro elementų sistemų naudojimas augs, nes:

a) ES vykdomi projektai šių sistemų skatinimui iki 2030 metų ir bus skiriamos subsidinės lėšos.

b) Esant paramai ir pradėjus masinę gamybą, įrangos kaina sumažės.

b) Pastoviai didėja elektros energijos poreikiai ir griežtinamos atmosferos teršimo normos, todėl mažai aplinką teršiančių technologijų naudojimas bus vis aktualesnis.

## Literatūra

1. COGEN Europe. (2013). Micro CHP position paper. [žiūrėta 2016-02-06]. Prieiga per internetą [http://www.cogeneurope.eu/medialibrary/2013/07/10/3abaf321/COGEN%20Europe\\_micro%20CHP%20position%20paper.pdf](http://www.cogeneurope.eu/medialibrary/2013/07/10/3abaf321/COGEN%20Europe_micro%20CHP%20position%20paper.pdf).
2. CODE2 Cogeneration Observatory and Dissemination Europe. (2014). *Micro-CHP potential analysis European level report*. [žiūrėta 2016-02-06]. Prieiga per internetą [http://www.code2-project.eu/wp-content/uploads/D2.5-2014-12-micro-CHP-potential-analysis\\_final.pdf](http://www.code2-project.eu/wp-content/uploads/D2.5-2014-12-micro-CHP-potential-analysis_final.pdf)
3. Eurostat . (2015). Chp data. [žiūrėta 2016-02-08.]. Prieiga per internetą <http://ec.europa.eu/eurostat/documents/38154/4956229/CHP+data+2005-2013/62e87958-0b9a-4195-af70-356493e12233>
4. Adomavičius , V.; Žukienė, L. (2010). Mažosios kogeneracinės elektrinės ir jų plėtros perspektyvos. *Lietuvos taikomųjų mokslų akademijos mokslo darbai : tarptautinis inovacinis taikomųjų mokslų darbų žurnalas*, 6, 56-69., ISSN 1822-0754.
5. Ehyaei, M.A., Mo-zafari, A. ( 2010). Energy, economic and environmental analysis of a micro gas turbine employed for onsite combined heat and power production. *Energy and Buildings*, 42, 259-264.
6. Mingxi L., Yang, S., Fang, F. (2014). Combined cooling, heating and power systems: A survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 35, 1–22.
7. Moore, M.J. (2002). *Microturbine Generators*. Professional Engineering Publishing Ltd., Institution of Mechanical Engineers, ISBN 1-86058-391-1.
8. Pilavachi, P.A. (2002). Mini and micro gas turbines for combined heat and power. *Applied Thermal Engineering*.
9. Bruno J. C., Coronas A. (2002) Distributed Generation of Energy using Micro Gas Turbine: Polygeneration Systems and fuel flexibility. [žiūrėta 2016-02-20]. Prieiga per internetą <http://www.icrepq.com/PLENARIAS/PL1.BRUNO.pdf>
10. Projektas enefield. (2016). [žiūrėta 2016-03-02.]. Prieiga per internetą <http://enefield.eu/news/press-release-10-fuel-cell-micro-chp-in-europe-on-the-rise-ene-field-project-passes-major-milestone>
11. Wenyuan, Y., Yingru, Z., Vincenzo, L., Nigel, B. (2014). Optimal design and operation of a syngas-fuelled SOFC micro – CHP system for residential applications in different climate zones in China. *Energy and Buildings*, 80, 613-622.
12. Gandiglio, M., Lanzini, A., Santarelli, M., Leone, P. (2014). Design and optimization of a proton exchange membrane fuel cell CHP system for residential use, *Energy and Buildings*, 381–393.
13. Alexandros, A., Eric, S. Fraga, Dan J.L. Brett. (2015). Options for residential building services design using fuel cell based micro-CHP and the potential for heat integration , *Applied energy*, 138, 685-694.
14. Napoli, R., Gandiglio, M., Lanzini, A., Santarelli, M. (2015) Techno-economic analysis of PEMFC and SOFC micro-CHP fuel cell systems for the residential sector, *Energy and Buildings*, 131-146.
15. Capstone microturbine. (2016). žiūrėta [2016-03-08]. Prieiga per internetą <http://www.capstoneturbine.com/products>
16. Capstone microturbine (2016). Factory protection plan. žiūrėta [2016-03-08]. Prieiga per internet <http://content.stockpr.com/capstoneturbine/files/Docs/Factory+Protection+Plan.pdf>

17. Capstone microturbine (2007) Model C65 user's manual. žiūrėta [2016-03-08]. Prieiga per internetą [2016-03-08]. Prieiga per internetą  
[http://www.globalmicroturbine.com/pdf/LFG/400017A\\_C65\\_Users\\_Manual\\_V5XX.pdf](http://www.globalmicroturbine.com/pdf/LFG/400017A_C65_Users_Manual_V5XX.pdf)
18. Capstone Turbine Corporation. (2002). Technical Reference, Capstone MicroTurbine Fuel Requirements. žiūrėta [2016-03-10]. Prieiga per internetą  
<http://www.globalmicroturbine.com/pdf/fuelspecs.pdf>
19. Gillette, F., S. Capstone Turbine Corporation. Capstone microturbine. (2007). CHP Case Studies – Saving Money and Increasing Security
20. Capstone Turbine Corporation. (2014). Technical Reference, Capstone MicroTurbine Fuel Requirements. žiūrėta [2016-03-10]. Prieiga per internetą  
<http://www.gmp.uk.com/pdf/E4PL/CHP/Radu%20Anghel%20-%20Capstone%20Turbine%20Corporation%20-%20Technology%20of%20Microturbines%20as%20an%20interesting%20option%20for%20CHP%20applications.pdf>
21. Moya, M., Bruno, J.C., Eguia, P., Torres, E., Zamora, I., Corona, A. (2011). Performance analysis of a trigeneration system based on a micro gas turbine and an air-cooled, indirect fired, ammonia-water absorption chiller, *Applied Energy* 88, 4424–4440.
22. U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory. (2002). Fuel Cell Handbook
23. Winter, M., Brodd, J., R. (2004) What Are Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors?, *Chem. Rev.*, 104, 4245-4269.
24. Fuel cell energy. žiūrėta [2016-04-10]. Prieiga per internetą  
<http://www.fuelcellenergy.com/advanced-technologies/solid-oxide-fuel-cells/>
25. Žiūrėta [2016-04-10]. Prieiga per internetą  
<http://www.forbes.com/sites/tomkonrad/2013/12/11/twelve-hydrogen-and-fuel-cell-stocks/#449b3535326d>
26. Pehnt, M. (2003). Life-cycle analysis of fuel cell system components, *Technology and Applications*, Volume 4, Part 13, pp 1293 – 1317
27. Farshid, Z., Fung, S., A. (2010). Advanced Power Generation Technologies: Fuel Cells, ISBN: 978-953-307-401-6.
28. Moreci, E., Ciulla, G., Lo Brano, V. (2016) Annual heating energy requirements of office buildings in a European climate, *Sustainable Cities and Society*, 20, 81-95.
29. Lietuvos Respublikos Seimas (2008). STR 2.09.04:2008. žiūrėta [2016-04-20]. Prieiga per internetą  
[http://www3.lrs.lt/pls/inter3/dokpaieska.showdoc\\_l?p\\_id=320473&p\\_query=&p\\_tr2=](http://www3.lrs.lt/pls/inter3/dokpaieska.showdoc_l?p_id=320473&p_query=&p_tr2=)
30. Valstybinė kainų ir energetikos kontrolės komisija. (2015). *Santykinių šilumos pastatui šildyti, karštam vandeniui ruošti ir karšto vandens temperatūrai palaikyti suvartojimo rodiklių apskaičiavimo metodika*. žiūrėta [2016-04-20]. Prieiga per internetą  
[http://www.lrs.lt/pls/proj/dokpaieska.showdoc\\_l?p\\_id=1014297&p\\_org=212&p\\_fix=n&p\\_gov=n](http://www.lrs.lt/pls/proj/dokpaieska.showdoc_l?p_id=1014297&p_org=212&p_fix=n&p_gov=n)
31. Gimbutis, G., Kajutis, K., Pranckūnas, A., Švenčianas P. (1993). Šiluminė technika
32. El tertiary. žiūrėta [2016-04-20]. Prieiga per internetą  
[https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/el-tertiary\\_el\\_tertiary\\_summary\\_slides\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/el-tertiary_el_tertiary_summary_slides_en.pdf)



33. Dujinių katilų katalogas. žiūrėta [2016-04-20]. Prieiga per internetą <http://katilai.lt/sime-rs-129-mk-ii-129kw-dujinis-stacionarus-ketinis-katilas/>
34. Žiūrėta [2016-04-20]. Prieiga per internetą <https://www.ambergrid.lt/lt/perdavimo-paslaugos/kalendorius>
35. Friedrich, M., Armstrong, P., R., D. L. Smith, D. L., (2004) New Technology Demonstration of Microturbine with Heat Recovery at, PNNL-14417.
36. Fuel cell energy (2013) Žiūrėta [2016-04-20]. Prieiga per internetą <https://www.netl.doe.gov/File%20Library/events/2013/seca/Ghezel-Ayagh-14th-Annual-SECA-Workshop---FCE-Team-Presentation.pdf>
37. Larminie, J., Dicks, A. (2002) Fuel Cell Systems explained. Second Edition. ISBN:0-470-84857-X, 428 p
38. National institute of building science. žiūrėta [2016-04-20]. Prieiga per internetą <https://www.wbdg.org/resources/chp.php>